

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



**MODELADO Y SIMULACIÓN DE PROCESO FLEXIBLE PARA LA
RECUPERACIÓN DE ARENA PARA FUNDICIÓN**

POR

OMAR GARCÍA MONTALVO

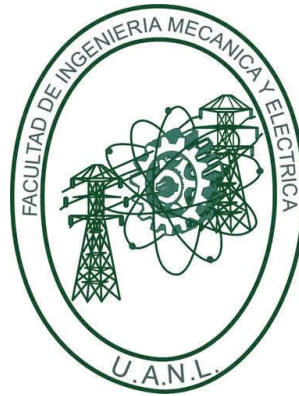
**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

Noviembre, 2017

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**MODELADO Y SIMULACIÓN DE PROCESO FLEXIBLE PARA LA
RECUPERACIÓN DE ARENA PARA FUNDICIÓN**

POR

OMAR GARCÍA MONTALVO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**


Noviembre, 2017

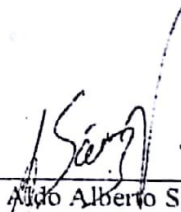
UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

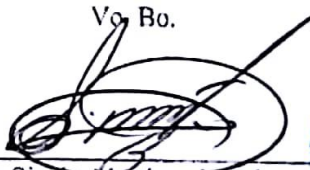
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis "Modelado y simulación de proceso flexible para la recuperación de arena para fundición" realizada por el alumno(a) Omar García Montalvo, con número de matrícula 1831341, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis


Dr. Jacobo Hernández Sandoval
Director


Dr. Sergio Haro Rodríguez
Revisor


M.C. Aldo Alberto Sáenz Valdez
Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Noviembre 2017

DEDICATORIA

A mis padres, por el apoyo que siempre me han brindado, por sus buenos consejos y el haberme guiado día con día por un buen camino y enseñarme el valor del trabajo y que siempre podemos alcanzar las metas que nos propongamos, gracias por creer en mí.

A mi hermana, por todo el apoyo que siempre me brinda, por ser una gran persona con la cual siempre puedo contar.

A mi familia, por su gran apoyo y buenos consejos.

A todos mis amigos con los cuales me ha tocado compartir esta vida.

AGRADECIMIENTOS

Al Concejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico durante el desarrollo de este trabajo.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León por la oportunidad que se me brindó para realizar esta maestría y poder cumplir mis sueños, agradezco a todos los profesores que me brindaron el conocimiento estos años, gracias a todos.

Al Driven Center por el conocimiento y el equipo brindado para el desarrollo de este proyecto, donde pude desarrollar el conocimiento obtenido durante esta maestría, agradezco a las personas que forman parte de este centro que más que compañeros de trabajo, me llevo grandes amigos.

A la empresa Nemak por el apoyo brindado para el desarrollo de este proyecto, así como a todo el equipo de trabajo del CDT que formó parte de este proyecto.

Al Dr. Sergio Haro por su compromiso, dedicación y buenos consejos que siempre nos ha brindado, por el apoyo para llevar a cabo esta maestría y proyecto, un gran profesor y amigo.

Al Dr. Jacobo Hernández Sandoval por la dedicación y el apoyo brindado en la maestría, así como en desarrollo de este proyecto.

Al M. en C. Aldo Sáenz por el apoyo y el conocimiento brindado para poder realizar este proyecto.

INDICE GENERAL

Capítulo	Página
RESUMEN	XII
CAPITULO 1	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	2
1.3 PROBLEMÁTICA	2
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	2
1.4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	3
1.5 JUSTIFICACION	3
1.6 HIPOTESIS	3
CAPITULO 2	4
RECUPERACION DE ARENA PARA FUNDICION	4
2.1 ARENA	4
2.1.1 TIPOS DE ARENA	4
2.1.2 ARENA SÍLICE	5
2.1.3 ARENA CIRCONIO	5
2.1.4 ARENA CROMITA	6
2.1.5 ARENA OLIVINA	6
2.1.6 ARENA MULITA	7
2.1.7 ARENAS SINTÉTICAS	7
2.1.8 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA ARENA	7
2.2 CORAZONES	9
2.2.1 CLASIFICACION DE LOS CORAZONES PARA FUNDICION	10
2.3 SISTEMAS DE AGLUTINACION QUIMICA	10

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN EN BASE A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA; ORGÁNICA E INORGÁNICA	11
2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN EN BASE AL MECANISMO CATALIZADOR	11
2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN EN BASE AL MECANISMO DEL CURADO	12
2.4 RECUPERACIÓN DE ARENAS PARA FUNDICION	12
2.4.1 RECUPERACIÓN MECANICA	13
2.4.2 RECUPERACIÓN TERMICA	13
2.4.3 RECUPERACIÓN HUMEDA	14
CAPITULO 3	15
INDUSTRIA Y MANUFACTURA MODERNA	15
3.1 INDUSTRIA 4.0	15
3.2 INTERNET DE LAS COSAS	17
3.3 MANUFACTURA ESBELTA.....	19
3.4 MANUFACTURA DIGITAL.....	21
3.5 SISTEMA	23
3.5.1 TIPOS DE VARIABLES DEL SITEMA	24
3.5.2 TIPOS DE SISTEMAS	25
3.6 MODELO	26
3.6.1 MODELOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS.....	29
3.6.2 MODELOS DE CAJA NEGRA	30
3.7 SIMULACIÓN	30
3.7.1 TIPOS DE SIMULACIÓN	33
3.7.2 MODOS DE SIMULACION	34
3.7.3 ETAPAS DE DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACION	35
3.8 SIMULACIÓN POR EVENTOS DISCRETOS	40
3.8.1 TRAYECTORIA DE MODELO DE SIMULACIÓN	42
3.8.2 TIEMPO EN SISTEMAS DISCRETOS.....	42
3.9 SOFTWARES DE SIMULACION	44
3.9.1 PLANT SIMULATION®	45
CAPITULO 4	50
DESARROLLO EXPERIMENTAL	50
4.1 METODOLOGIA.....	50

4.2 DESARROLLO DEL MODELO DE RECUPERACION EN PLANT SIMULATION®.....	53
4.2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA.....	53
4.2.2 ANALISIS DEL SISTEMA	55
4.2.3 FORMULACION DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	56
4.2.4 SELECCIÓN DEL LENGUAJE.....	68
4.2.5 CODIFICACIÓN DEL MODELO.....	70
4.2.6 VALIDACIÓN Y EXPERIMENTACION DEL MODELO	71
4.3 DIGITALIZACIÓN DEL MODELO 3D EN Nx®	75
4.4 MODELO DE SIMULACION 3D EN PLANT SIMULATION®.....	80
CAPITULO 5	82
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	82
5.1 ANÁLISIS DEL MODELO DE RECUPERACION OPTIMO EN PLANT SIMULATION®	82
5.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO DE RECUPERACIÓN OPTIMO EN PLANT SIMULATION®	85
5.3 ESCALAMIENTO Y OPTIMIZACION PARA PRODUCCIÓN A MAYOR ESCALA DEL MODELO DE RECUPERACIÓN EN PLANT SIMULATION®.....	92
5.4 RESULTADO DE LA DIGITALIZACIÓN DE LA PLANTA RECUPERADORA DE ARENA EN Nx®	99
5.5 RESULTADO DEL MODELADO 3D DE LA PLANTA RECUPERADORA DE ARENA EN PLANT SIMULATION®	100
CAPITULO 6	101
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	101
6.1 CONCLUSIONES	101
6.2 RECOMENDACIONES.....	102
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXOS	107

INDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1.- Arena Sílice.	5
Figura 2.- Arena Circonio.....	6
Figura 3.- Arena Cromita.	6
Figura 4.- Arena Olivina.	7
Figura 5.- Morfologías de los granos de arena [7].	8
Figura 6.- Entorno que impulsa la fábrica inteligente en la industria 4.0 [8].	16
Figura 7.- Conexión de equipos tradicionales a la red inteligente [18].	17
Figura 8.- 7 Tipos de desecho en la manufactura esbelta [23].	20
Figura 9.- Arquitectura básica de la fábrica digital (modificado [28]).	22
Figura 10.- Formas de estudio de un sistema [35].	24
Figura 11.- Variables en un sistema [36].	25
Figura 12.- Estructura básica de la teoría de modelado [32].	28
Figura 13.- Modos de simulación [36].	35
Figura 14.- Etapas de desarrollo de un modelo de simulación [35].	37
Figura 15.- Relación entre sistema, modelo y simulación (modificado [41]).	39
Figura 16.- Grafica de trayectoria dinámica de un modelo de simulación (modificado[45]).	42
Figura 17.- Tiempo en modelos de simulación continuos y discretos.	43
Figura 18.- Software de simulación <i>Plant Simulation®</i>	45
Figura 19.- Desarrollo experimental del modelo de simulación.	51
Figura 20.- Metodología para realizar modelos de simulación de procesos de manufactura.	52
Figura 21.- Variables de entrada y salida del sistema de recuperación de arena.	53
Figura 22.- Diagrama de Flujo de Proceso de Recuperación.	55
Figura 23.- Flujo de material por equipos del primer nivel.	57
Figura 24.- Flujo de material por equipos del segundo nivel.	58
Figura 25.- Flujo de material por equipos del tercer nivel.	59
Figura 26.- Principios de Simulación de Proceso en 2D.	65
Figura 27.- Tabla de adquisición de datos para el funcionamiento de un elemento.	66
Figura 28.- Modelo de Simulación Piloto en 2D.	67
Figura 29.- Vistas de procesos en modelo piloto.	67
Figura 30.- Modelo de simulación 2D simplificado.	68
Figura 31.- Programación del modelo de simulación.	69
Figura 32.- Tabla de Adquisición de Datos.	70
Figura 33.- Validación de datos de tiempo en la simulación.	71
Figura 34.- Validación de datos de cantidad de materiales de aporte en la simulación.	72
Figura 35.- Validación de pérdidas de material en la simulación.	73

Figura 36.- Corrida del modelo de simulación validado.	74
Figura 37.- Levantamiento de dimensiones de los elementos de la Planta recuperadora de arena.	75
Figura 38.- Digitalización de elementos.....	76
Figura 39.- Layout de Ensamble de Elementos.	76
Figura 40.- Primer Ensamble de la planta Piloto.	77
Figura 41.- Ensamble de elementos de planta piloto.....	77
Figura 42.- Cambios en el ensamble de la planta piloto.....	78
Figura 43.- Modelado de tuberías, electroválvulas y bombas de la planta piloto.	78
Figura 44.- Diseño de extractor de humo de planta piloto.	79
Figura 45.- Modelo 3D de planta recuperado de arena.	79
Figura 46.- Simulación básica del proceso de recuperación.....	80
Figura 47.- Simulación 3D de proceso de recuperación de arena con modelos de CAD reales.	81
Figura 48.- Modelo de simulación de proceso de recuperación.....	82
Figura 49.- Selector de número de enjuagues.....	83
Figura 50.- Tabla de adquisición de datos de entrada.	83
Figura 51.- Modificación de parámetros de funcionamiento.	84
Figura 52.- Indicadores de cantidad, cargas y ciclos.....	84
Figura 53.- Modelo de simulación sin considerar perdidas de material.	85
Figura 54.- Datos de operación del modelo principal sin considerar perdidas.	86
Figura 55.- Modelo de simulación considerando perdidas de material	87
Figura 56.- Datos de operación del modelo principal considerando perdidas.	88
Figura 57.- Tanque de agua recuperada de enjuague.	91
Figura 58.- Datos de operación del modelo a mayor escala sin considerar perdidas.	92
Figura 59.- Modelo se simulación a mayor escala sin considerar perdidas de material.	93
Figura 60.- Modelo se simulación a mayor escala sin considerar perdidas de material.	94
Figura 61.- Datos de operación del modelo a mayor escala considerando perdidas.	94
Figura 62.- Elementos del diagrama de flujo que no cumplen con el requerimiento del sistema para una mayor producción.	97
Figura 63.- Ensamble final de la planta recuperadora de arena.	99
Figura 64.- Modelo final de la simulación 3D del proceso de recuperación.	100

INDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1.- Clasificación de los sistemas de aglutinación en base al mecanismo catalizador [11].	11
Tabla 2.- Sistemas de aglutinación, clasificado en base al mecanismo de curado [7].	12
Tabla 3.- Elementos utilizados en el sistema de recuperación.	54
Tabla 4.- Materiales utilizados en el proceso de lavado.	54
Tabla 5.- Equipos utilizados por nivel.	56
Tabla 6.- Función de quipos del primer nivel.	57
Tabla 7.- Función de equipos del segundo nivel.	59
Tabla 8.- Función de equipos del tercer nivel.	60
Tabla 9.- Tiempos de las operaciones del ciclo de recuperación.	63
Tabla 10.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena sin considerar perdidas.	86
Tabla 11.- Ciclos realizados cada ocho horas durante 5 días sin considerar perdidas.	87
Tabla 12.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena considerando perdidas.	89
Tabla 13.- Ciclos realizados cada ocho horas durante 5 días sin considerar perdidas.	90
Tabla 14.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena sin considerar perdidas.	93
Tabla 15.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena sin considerar perdidas.	95
Tabla 16.- Tiempos de movimiento de material y flujo requerido en tuberías.	98

RESUMEN

Las empresas dedicadas a la fabricación de piezas de aluminio, se especializan en la producción de componentes de aluminio de alta complejidad y gran calidad tales como cabezas de motor, bloques de motor, partes de transmisiones entre otras.

Uno de los procesos de manufactura más empleados en la industria es la fundición, esta se encarga de llevar el aluminio hasta el punto de fusión, para que el metal adopte la forma deseada a través de un molde.

En el presente trabajo se pretende realizar el diseño y simulación, mediante la metodología de eventos discretos de una planta piloto para la recuperación de arena inorgánica con la cual se fabrican moldes y corazones para la fundición de piezas de aluminio para la industria automotriz, se requiere la reutilización de esta ya que es uno de los procesos más utilizados y se tiene la necesidad de implementar y desarrollar métodos nuevos, diferente y más eficientes conforme a los que se tienen hoy en día para la recuperación de arena para fundición, esto para poder reutilizarla en procesos posteriores, por lo que se generara un ahorro económico significativo, este trabajo presenta la alternativa de aplicar modelos de simulación en los que se consideren los distintos escenarios posibles, se trata de permitir a la empresa predecir, comparar y optimizar el comportamiento del proceso simulado en un tiempo muy breve sin el coste ni el riesgo de llevarlos a cabo, haciendo posible la representación de los procesos y recursos, en un modelo flexible, se comenzara realizando la simulación del proceso de recuperación en el software Plant Simulation[®], posteriormente se realizara la digitalización completa de los elementos mecánicos que conforman la planta piloto en el software de diseño NX[®] y por último se optimizara el modelo de simulación, para realizar mejoras de los tiempos y procesos de trabajo en las diferentes estaciones de la planta piloto, para realizar diferentes propuestas de modelos de producción a mayor escala.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

La industria hoy en día está en constante desarrollo y las técnicas que tradicionalmente se utilizaban no son apropiadas para el análisis de sistemas de manufactura complejos, considerando el constante cambio de las condiciones del mercado actual es esencial el diseñar sistemas de manufactura que sean capaces de proveer una gran variedad de productos en un espacio pequeño de trabajo [1]. La simulación es la imitación de la operación del proceso o sistema en el mundo real [2]. Es por esto que la simulación es una de las técnicas más utilizadas para analizar y evaluar el comportamiento dinámico de los sistemas complejos de manufactura. Combinando el poder de la matemática para realizar un método analítico y una modelación capaz para realizar simulaciones de los procesos para su fácil análisis, comprensión del comportamiento y efectos que tendrá el diseño del sistema simulado [3].

La simulación de sistemas de manufactura complejos son realizados mediante plataformas de simulación de eventos discretos, donde el control logístico puede ser implementado, mediante un lenguaje de programación o una interfaz gráfica [4]. Para la realización de proyectos de simulación se requieren estudios previos a su construcción o modificación, denominados estudios pilotos. Tales estudios pilotos se realizan utilizando la técnica llamada modelización, es decir, construcción de modelos donde se realiza el estudio con el fin de obtener conclusiones aplicables al sistema real. El sistema para poder subsistir debe adaptarse a los cambios, uno de los objetivos de la simulación es realizar ensayos de cambios en el sistema probándolos en el modelo, con el fin de elegir la mejor alternativa, y así enfrentar mejor la realidad que varía día a día [5].

Cada sistema de ingeniería o proceso está diseñado con un propósito, frecuentemente implica un rendimiento deseado de la operación o proceso de fabricación de un producto. En muchos casos, las actividades de diseño de ingeniería implican pruebas o experimentación, ya que el proceso no se comprende bien y el rendimiento deseado puede no estar garantizado. En el diseño de nuevos productos, los grupos de investigación y desarrollo realizan experimentos, construyen modelos y tratan de optimizar las respuestas relacionadas con el rendimiento del nuevo producto que se ha diseñado [6].

1.2 ANTECEDENTES

La planta dedicada a la fabricación de partes de aluminio para vehículos tales como monoblock, cabezas de motor, etc., en su mayoría se utilizan procesos de fabricación a base de moldes y corazones elaborados de arena para fundición aglutinada químicamente, por lo que la fabricación de cada parte genera cierta cantidad de arena residual, y actualmente se tienen pocas técnicas y procesos de recuperación para disminuir la cantidad de arena residual, así como el impacto ambiental que esta genera.

1.3 PROBLEMÁTICA

La arena para fundición aglomerada químicamente, es un recurso que la industria dedicada a la producción de piezas por fundición a utilizado constantemente en su proceso a lo largo de los años para la fabricación de moldes y corazones, esto genera grandes cantidades de arenas residuales, por lo que los costes de gestión de residuos y la obtención de arena nueva aumentara significativamente día con día, dado esto, se requiere desarrollar técnicas y procesos para la recuperación de arena de fundición y poder alcanzar un ahorro significativo en los costes de la materia prima, así como reducir el impacto ambiental que genera la arena residual.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar modelos de simulación virtual, utilizando una metodología de simulación por eventos discretos, en los cuales se consideren los distintos escenarios

posibles, tratando de predecir, comparar y observar el comportamiento del proceso, en un tiempo muy breve disminuyendo costo y riesgo de llevarlos a cabo, para llegar a un modelo óptimo y lograr compararlo con el sistema real, así como obtener modelos de producción a mayor escala.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtención de parámetros de operación de la planta piloto.
- Diseño de la metodología para la creación de modelos de simulación aplicables a procesos de manufactura.
- Modelar y Simular el proceso de recuperación de planta piloto en 2D y 3D.
- Optimizar el proceso de recuperación y obtener modelos de producción a gran escala.

1.5 JUSTIFICACIÓN

Actualmente el proceso de recuperación de arena para fundición se encuentra en desarrollo y es necesario realizar un modelo de simulación virtual, ya que con los elementos y softwares que se cuenta hoy en día, se facilita la implementación de nuevos procesos mediante la simulación para poder comprobar su factibilidad y disminuir el costo y riesgo antes de llevarlos a cabo.

1.6 HIPÓTESIS

Con el modelo de simulación virtual se podrán obtener parámetros de operación de distintos escenarios de producción, con la finalidad de comprobar la factibilidad de estos mediante el análisis y evaluación de resultados de los sistemas propuestos.

CAPÍTULO 2

RECUPERACIÓN DE ARENA PARA FUNDICIÓN

2.1 ARENA

La arena es un material inorgánico compuesto de granos minerales sueltos los cuales están constituidos por agregados pétreos y varían de tamaño granulométrico de 0.05 a 2 mm de diámetro. El termino arena solo hace referencia al tamaño de grano y no identifica a la composición química que compone los granos, por lo que se debe hacer referencia al nombre del componente principal, por ejemplo, arena sílice, arena de zirconio, arena de cromita.

2.1.1 TIPOS DE ARENA

La extracción de la arena para fundición se realiza a partir de depósitos, generalmente a lo largo de las costas de antiguos mares, los cuales son el producto de cambios en la superficie de la tierra a través del tiempo por la acción del viento, el agua, el hielo y la nieve. La composición química de los depósitos depende de la naturaleza de los materiales que fueron erosionados y la manera en que estos fueron depositados.

La arena más utilizada en la industria para la elaboración de moldes y corazones es la arena sílice (SiO_2), aunque también existen algunos otros tipos de arenas como son la circonio (ZrSiO_4), la cromita (FeCr_2O_4), la olivina ($(\text{Mg, Fe})_2\text{SiO}_4$), la mulita ($2\text{SiO}_2 \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$) y otras sintéticas (aluminosilicatos). Las arenas se pueden seleccionar de acuerdo a:

- La composición química.
- Tamaño y forma de grano.
- La distribución granulométrica.

- Compatibilidad con el sistema de aglutinación.
- Estabilidad dimensional a temperaturas elevadas.
- Su disponibilidad y su costo.

2.1.2 ARENA SÍLICE

La arena sílice mostrada en la **Figura 1**, está formada fundamentalmente por granos de dióxido de silicio (SiO_2), se caracteriza por tener una alta pureza y un comportamiento químico neutro. Este es uno de los minerales más duros que se encuentran en la naturaleza y de mayor abundancia, y presenta características refractarias, a continuación, se presentan algunas razones por las cuales la arena sílice es de las más empleadas para la fabricación de moldes y corazones.

- Es la más abundante en la naturaleza.
- Altamente refractaria.
- Fácil de extraer de los depósitos minerales naturales.
- Resistente al ataque químico.
- Se encuentra en una gran variedad de tamaños y distribuciones.
- Por tener compatibilidad con la mayoría de los aglutinantes orgánicos e inorgánicos.
- Por su bajo costo en relación con otras arenas.



Figura 1.- Arena Sílice.

2.1.3 ARENA CIRCONIO

Su composición es silicato de circonio (ZrSiO_4), con un contenido de 67% de circonio y un 33% de sílice. Se emplea en la fabricación de corazones y moldes sometidos a altas temperaturas como es el caso de piezas especiales para hacer

corazones de formas complicadas y muy delgadas que están sometidas a altas temperaturas, como es el caso de piezas masivas de fundición. La arena de circonio presenta excelentes propiedades refractarias, baja dilatación térmica y elevada conductividad térmica (**Figura 2**).



Figura 2.- Arena Circonio.

2.1.4 ARENA CROMITA

Su composición es óxido de cromo ($\text{FeO}:\text{Cr}_2\text{O}_3$), es aplicable a todos los tipos de aceros y muy apropiada para las piezas de acero al cromo, cromo-níquel y acero al manganeso. La dilatación térmica es mucho más baja que la arena sílice con lo que se reducen también los problemas derivados de la expansión de la arena. El contenido típico de sus óxidos mayoritarios es Cr_2O_3 : 46%, FeO : 27%, Al_2O_3 : 15% y MgO : 10% (**Figura 3**).



Figura 3.- Arena Cromita.

2.1.5 ARENA OLIVINA

Este tipo de arena mostrada en la **Figura 4**, principalmente está compuesta por silicatos de magnesio y hierro, encontrada en su estado natural en la fosforita, por lo que solo se puede obtener arena angular ya que esta arena es producto de la trituración del mineral, posee una conductividad térmica mayor al de la arena sílice y menor a la arena

cromita. Se utiliza principalmente para el moldeo de aceros al manganeso debido a su alta resistencia a la penetración y al ataque químico de estas aleaciones [7] [8].



Figura 4.- Arena Olivina.

2.1.6 ARENA MULITA

Es un aluminosilicatos natural ($2\text{SiO}_2:3\text{Al}_2\text{O}_3$) compuesto aproximadamente del 71.8% de Al_2O_3 y 28.2% de SiO_2 , tiene una densidad de 3.15Kg/dm^3 y una alta resistencia a la transferencia de calor, debido a su alto costo se emplea solo para la fabricación de aceros refractarios.

2.1.7 ARENAS SINTÉTICAS

Están formadas principalmente de mulita en formas esféricas, tienen una alta estabilidad térmica y baja expansión, su costo es muy elevado, además, debido a su fabricación los granos presentan gran porosidad, por lo que requieren de mayor cantidad de resina para formar corazones por lo tanto su costo se eleva.

2.1.8 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE LA ARENA

1. Granulometría

Hoy en día esta característica se determina por medio del No. AFS, el cual se representa por medio por medio de un análisis de distribución de mallas con diferentes diámetros y con esto se determina si la arena es del tipo gruesa, mediana o fina. Las características principales relacionadas con el tamaño de grano son la permeabilidad y el acabado superficial.

2. Morfología de los granos de arena

Es la característica principal para la producción de corazones debido a que de esta dependerá en gran parte el consumo de resinas, existen básicamente 3 formas de grano (**Figura 5**).

- Angular: Arena que presenta aristas y caras planas.
- Subangular: Arena que presenta bordes redondeados, picos, vértices y caras planas.
- Redondo: Arena de bordes redondeados y con apariencia esférica.

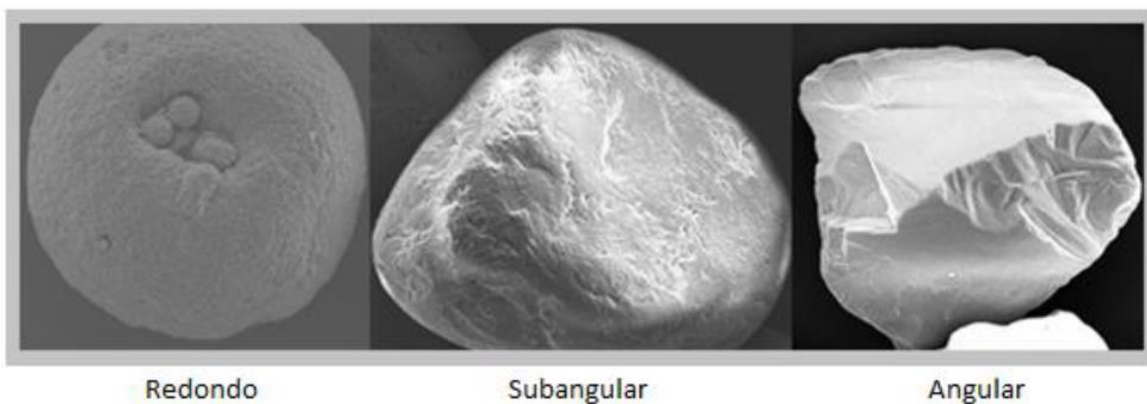


Figura 5.- Morfologías de los granos de arena [7].

Los granos redondos proveen el mejor arreglo entre granos por lo tanto se obtiene una mínima relación área-volumen, entonces un grano redondo proporcionará la mayor permeabilidad y requerirá la menor cantidad de resina para ser recubierto, caso contrario al de tipo angular y subangular.

3. Densidad

Entre mayor sea la cantidad de granos que se puedan unir entre un volumen determinado, mayor será la densidad y más fuerte serán los moldes y corazones, por lo tanto, entre más redondos sean los granos, mejor será la compactación y su densidad será mayo casi un 10% mayor que la ofrecida por las arenas angulares.

4. pH de la arena

El pH es un indicador de las impurezas presentes en la arena, las arenas muy alcalinas aceleran la reacción entre la resina y disminuyen el tiempo de almacenaje de la mezcla arena-resina. Por esta razón se debe determinar el pH de las arenas.

Los factores que influyen para aumentar el pH en la arena son:

- Alto contenido de finos.
- En la recuperación térmica, la alta temperatura genera componentes alcalinos como óxido de calcio (CaO), alúmina (Al_2O_3), y que son acumulativos en cada reciclaje.
- La presencia de contaminantes como partículas de aluminio, hierro y carbonato de calcio.

5. Pérdidas por ignición (LOI)

La prueba de pérdidas por ignición (LOI por sus siglas en inglés) es un ensayo que se utiliza para determinar el porcentaje de materiales orgánicos que se encuentran en la arena. El valor de esta medición indica la cantidad de resina o aditivos residuales adherida a los granos de arena después de la calcinación, si el índice de LOI es alto, se producirán problemas en las piezas. Este ensayo tiene gran utilidad para tener un control del proceso de recuperación de la arena y conocer que tan eficiente es el proceso de recuperación de arena [8].

2.2 CORAZONES

Los corazones son un agregado de arena preformado los cuales son empleados en la industria de la fundición para obtener formas complejas que difícilmente se obtendrían en un proceso de maquinado, por lo que, los corazones son insertados en un molde para conformar la parte interior de una pieza fundida. Para la fabricación de corazones se utilizan diversos procesos, entre ellos el de caja fría. Arena previamente mezclada con resinas de fenol-uretano se introduce con aire a alta presión dentro de las cavidades de un molde y después de un tiempo de curado, el corazón se consolida a una alta resistencia. Este proceso es uno de los más empleados dentro de la industria de la

fundición automotriz ya que con la alta velocidad de curado en la mezcla de arena y resinas favorece los sistemas de alta producción de las plantas actuales [9] [10].

2.2.1 CLASIFICACIÓN DE LOS CORAZONES PARA FUNDICIÓN

Los corazones para fundición se clasifican en dos tipos atendiendo a los materiales con que son fabricados: corazones metálicos y corazones de arena. La clasificación de corazones se divide en cinco clases, dependiendo de la complejidad de la configuración que se requiera en la pieza y las condiciones de trabajo.

Clase I. Son corazones de configuración complicada que crean en la pieza solidificada cavidades que no se podrían labrar; se aplican a cavidades en las que se requiere un excelente acabado superficial.

Clase II. Son corazones de configuración complicada que, además de partes gruesas, tienen salientes delgadas.

Clase III. Son corazones de complejidad media, sin partes muy delgadas. Estos corazones hacen cavidades en la pieza de elevadas características superficiales.

Clase IV. Son corazones de configuración que crean en la pieza superficies de rugosidad considerable. Se aplican en condiciones donde el acabado superficial no requiera especial atención.

Clase V. Son corazones gruesos que forman grandes cavidades en piezas de gran tamaño [11].

2.3 SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN QUÍMICA

Los sistemas de aglutinación se han desarrollado constantemente desde su introducción a mediados de la década de 1940. El proceso más utilizado en esta época fue el de arena verde, el cual consistía en fabricar los corazones de arena mediante un proceso de curado en horno con arena aglomerada con aceite. El desarrollo de los sistemas de moldeo tomo vertiginosos cambios después de la segunda guerra mundial. Los sistemas de resina por moldeo en cascara y sistemas endurecidos por gas dióxido de carbono- silicato fueron introducidos en la década de 1950. En décadas posteriores se

utilizaron resinas curadas en caja caliente, sistemas de auto-fraguado y procesos como el de caja fría [7].

En la actualidad existen tres formas de clasificar los diferentes procesos de aglutinación, las cuales son: en la base de su composición química, al mecanismo catalizador y al mecanismo físico de curado.

2.3.1 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN EN BASE A SU COMPOSICIÓN QUÍMICA; ORGÁNICA E INORGÁNICA

Los sistemas aglutinantes inorgánicos son los que no contienen carbono en sus moléculas aglutinantes, los sistemas inorgánicos son por lo general muy poco reactivos y alcanzan resistencias menores, los sistemas inorgánicos de resina requieren mayor atención durante la fabricación del corazón, el moldeado y proceso de fundición que los sistemas orgánicos. Estos sistemas están basados en una tecnología silicato y fosfato/metal oxido. Todos los demás sistemas utilizados son del tipo orgánico.

2.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN EN BASE AL MECANISMO CATALIZADOR

Esta clasificación está dada por la forma en que el sistema es químicamente catalizado. Sistema de aglutinamiento tipo ácido ($\text{pH} < 7$), son curados mediante la adición de material alcalino y sistemas de aglutinamiento básico ($\text{pH} > 7$), son curados mediante la adición de material ácido. Existen también otros sistemas de aglutinamiento químico curados por varios mecanismos que son independientes de un pH, esta clasificación se muestra en la siguiente **Tabla 1**.

Tabla 1.- Clasificación de los sistemas de aglutinación en base al mecanismo catalizador [11].

Ácido	Básico	Otro
Silicato SO_2	Autofraguante éster fenólico	Moldeo en cáscara
Caja tibia	Caja fría éster fenólico	Autofraguante silicato
Caja caliente	Autofraguante uretano	Core oil oxidación
SO_2 furano	Caja fría fenol-uretano	Fosforo/óxido metal
SO_2 acrílico epoxi	Autofraguante polyol uretano	

2.3.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE AGLUTINACIÓN EN BASE AL MECANISMO DEL CURADO

Esta clasificación se basa en la forma en la cual los moldes y corazones son físicamente curados. En la **Tabla 2** se muestra la clasificación de los tres sistemas de curado existentes, tales como el sistema de caja fría, el cual consiste en poner la mezcla en contacto con un catalizador vaporizado, otro sistema es el de caja caliente, el cual consiste en poner en contacto la mezcla con una fuente de calor de curado, y por último el sistema no horneado el cual consiste en mezclar todos los componentes con un catalizador líquido que reacciona a temperatura ambiente [7] [8] [11].

Tabla 2.- Sistemas de aglutinación, clasificado en base al mecanismo de curado [7].

Caja fría	Caja caliente	No horneado
Acrílico epóxido SO ₂	Furánico caja caliente	Furánico ácido
Furánico SO ₂	Fenólica caja caliente	Fenólico ácido
Fenólico uretano amina	Shell	Fenólico éster
Silicato de sodio CO ₂	Aluminosilicatos	Silicato éster
Fenólico CO ₂	Corazón en aceite	
	GMbond	

2.4 RECUPERACIÓN DE ARENAS PARA FUNDICION

La generación de residuos industriales se ha incrementado en los últimos años en base al avance de la tecnología de producción. A esta situación han colaborado varios factores entre los que fundamentalmente se pueden destacar el aumento del consumo, la obsolescencia, la mayor productividad y la facilidad y bajo costo de vertederos en países subdesarrollados. Existen dos caminos posibles para esta situación: la reducción en la generación y la mitigación mediante el fomento de la reutilización o del reciclaje.

La composición de las arenas residuales es variable dependiendo de las diversas etapas del proceso, de los materiales utilizados y de las tecnologías utilizadas en el proceso de fundición. Existen dos formas de revalorizar las arenas residuales de fundición no peligrosas: reutilización y reciclaje. Mientras la primera corresponde a la

etapa de recuperación, la segunda consiste en darle un uso distinto a las arenas residuales [12].

Actualmente, existen métodos para la recuperación de arena utilizada en fundición, estos métodos se realizan mediante procesos mecánicos, térmicos y de lavado.

2.4.1 RECUPERACIÓN MECÁNICA

En este proceso la arena se somete a una acción de rozamiento o abrasión con lo que los aglomerados se disgregan en partículas individuales y en donde los residuos de resina adheridos se separan de las partículas de arena. Los residuos de resina y las partículas de arena finas se separan entonces por clasificación. Este proceso es por si insuficiente como un proceso viable para la regeneración de arena que ha sido aglomerada con una resina resólica alcalina de fenol-formaldehído. El proceso mecánico de recuperación no elimina la totalidad de los residuos de resina de las partículas de arena y las propiedades de re-aglomeración de la arena regenerada son inferiores en comparación con las propiedades de aglomeración de una arena nueva, por lo que tanto las arenas recuperadas mecánicamente pueden tener un uso muy limitado, teniendo que recurrir en muchos casos a arenas vírgenes [13].

2.4.2 RECUPERACIÓN TÉRMICA

Anteriormente la arena para fundición se recupera mediante procesos mecánicos, con los cuales no se eliminan por completo los productos que van siendo absorbidos por la arena durante los procesos sucesivos de fundición. Esto hace que las arenas se vayan deteriorando progresivamente, hasta saturarse y hacerlas inservibles [14]. Por lo tanto, otro proceso que se utiliza normalmente para tratar arena de fundición es la recuperación térmica, la cual consiste en un proceso de regeneración térmica en donde la arena se calienta a una temperatura suficientemente alta para separar cualquier residuo de aglomerante que esté presente. Según el tipo de proceso de regeneración térmica, en algunos casos, se emplean unidades rotativas con quemadores, las cuales se alimenta con terrones de arena usada o también con arena ya triturada para posteriormente realizar el proceso de recuperación [13].

2.4.3 RECUPERACIÓN HÚMEDA

La recuperación húmeda es otro proceso utilizado para la recuperación de arena para fundición, el cual consiste en lavar la arena con solventes para la eliminación de los aglutinantes. La arcilla suelta se suspende fácilmente en agua y mediante una vigorosa acción de lavado, se liberan los residuos de aglutinante de los granos de arena. El aglutinante y los finos liberados se separan y eliminan mediante lavado. La recuperación húmeda limpia las arenas muy eficientemente y la arena regenerada es casi equivalente en pureza y limpieza a la arena nueva. Por lo tanto, se puede utilizar en lugar de arena nueva en la fabricación de moldes y corazones. Algunas de las desventajas de este proceso son los altos requerimientos de agua y la necesidad de tratar y limpiar el agua antes de la recirculación o la eliminación de esta, son problemas operativos importantes con los sistemas de recuperación húmeda. Además, el costo del equipo es alto y se requiere de espacios grandes para los equipos [15].

CAPÍTULO 3

INDUSTRIA Y MANUFACTURA MODERNA

3.1 INDUSTRIA 4.0

En los últimos diez años hemos sido testigos de una transformación fundamental en nuestra vida diaria a través de la aparición de Tecnologías de Información y Comunicación. Las computadoras son más pequeñas cada vez y se logran encontrar en la mayoría de nuestros dispositivos y más allá de todo esto, la comunicación por internet [7]. La Industria 4.0 y el Internet Industrial de las Cosas (IIoT) se ha convertido en uno de los conceptos más hablados en la industria moderna en los últimos años [8]. El término “Industria 4.0” es considerado como una importante estrategia para seguir siendo competitivos en el futuro, esto incluye el diseño e implementación de productos competitivos y servicios [9]. Este término fue mencionado por primera vez como una iniciativa estratégica clave del gobierno federal alemán, High Tech-Strategy 2020 plan de acción 2011. La fábrica del futuro se caracteriza por procesos inteligentes, interconectados, integrado y orientado en tiempo real [10].

En años recientes el concepto de Industria 4.0 a estado ganando gran importancia en Europa, esto ha significado un desarrollo que cambio fundamentalmente las industrias tradicionales (Manhart, K., 2015) [9]. En Alemania, esta tendencia se ha nombrado la cuarta revolución industrial, en forma abreviada, Industria 4.0 (Kagermann, Wahlster, Helbig, 2013). La Industria 4.0 es un sinónimo de la transformación de las fabricas actuales a Smart fábricas, las cuales logran tener un mayor control de los sistemas y las numerosas bases de datos, donde se analiza y obtiene información precisa acerca de los requerimientos del nuevo mercado, las Smart fabricas están destinadas a abordar y superar los retos actuales de los ciclos de vida más cortos de los productos,

altamente personalizados y la dura competencia mundial [11]. En Alemania ha comenzado un gran debate sobre la Industria 4.0 y se ha extendido a otros países, como US y Corea. La idea detrás de este término es que, las tres primeras revoluciones industriales se produjeron como resultado de la mecanización y la electricidad. Ahora la introducción de IoT (Internet of Things) y CPS (Cyber-Physical Systems) en el entorno de fabricación está marcado el comienzo de una cuarta revolución industrial [7]. El corazón de la Industria 4.0 en términos conceptuales es la fábrica inteligente y todo lo que gira entorno a esta entidad central que conforma el modelo de negocio. Podemos observar en la **Figura 6** como la Industria 4.0 trabajara en teoría, podemos ver que todo, desde la cadena de suministro, modelo de negocio y procesos está ahí para proporcionar la fábrica inteligente [8].



Figura 6.- Entorno que impulsa la fábrica inteligente en la industria 4.0 [8].

Por último, pero no menos importante, está el factor humano, que es un punto fundamental en la Industria 4.0 ya que con la implantación de estas tecnologías supongan el despido del personal menos calificado, generando, por lo tanto, un rechazo de las bases de la empresa desde el inicio. Nada más lejos de la realidad, la Industria 4.0 aboga por el papel fundamental de las personas en la cadena de producción, pero

cambiando el rol de “operador” al de “controlador”. Este cambio es fundamental ya que las personas pasan a ser parte de la cadena de valor de la empresa, siendo proactivas en vez de reactivas, y participando en la toma de decisiones de la empresa [12].

3.2 INTERNET DE LAS COSAS

El termino Internet de las Cosas fue mencionado por primera vez en 1999 por Kevin Ashton en una de sus presentaciones, donde se mencionó la integración de los objetos cotidianos en una red de comunicación e información y que al día de hoy se está convirtiendo en una realidad [13] [14].

En los últimos años, la tecnología de Internet de las Cosas (IoT), se aplica cada vez más en los distintos ámbitos tecnológicos donde se requiere de un monitoreo especializado desde cualquier lugar en tiempo real [14] [15]. El internet de las cosas está desempeñando un papel muy importante en estos días ya que se puede obtener la comunicación desde equipos industriales tradicionales hasta objetos comunes del hogar (**Figura 7**), por lo que ha tomado gran importancia en la industria moderna y ha constituido los pilares básicos en la formación de las distintas aplicaciones tecnológicas de comunicación e información [16] [14].



Figura 7.- Conexión de equipos tradicionales a la red inteligente [18].

El rápido desarrollo del internet de las cosas a permite la integración de objetos físicos (sensores, máquinas, automóviles, edificios y otros elementos) en una red informática que permite la interacción y cooperación de todos los objetos conectados, para alcanzar objetivos en común que contribuyen en nuestra vida cotidiana [17].

El termino internet de las cosas es considerado un sinónimo de la industria 4.0, dado que ambos términos conducen a la innovación e investigación tecnológica, el internet de las cosas describe semánticamente un movimiento tecnológico, mientras que la Industria 4.0 se asocia con el impacto económico esperado, por lo tanto, el internet de las cosas conduce a la industria 4.0 [15].

Existen gran número de aplicaciones de internet de las cosas, a menudo algunas son difíciles de implementar debido a las restricciones de tiempo, memoria, procesamiento, restricciones de energía, así como al gran número de dispositivos que estas requieren [8].

Uno de los aspectos importantes dentro del cambio de tecnologías y la creación de redes de información, es la inseguridad de información dentro de las aplicaciones de internet de las cosas ya que amenaza los sistemas directamente, dado que no se cuenta con la normalización del procesamiento de datos y existen hackers, software maliciosos y virus que perturban la integridad de los datos e información. Las aplicaciones pueden brindar comodidad a los usuarios, pero si no puede garantizar la seguridad de la privacidad personal, la información privada puede ser filtrada en cualquier momento por lo que la seguridad no puede ser ignorada [18] [15].

En la fábrica el internet de las cosas se puede definir como un futuro en el que todos los días los objetos físicos en la planta, las personas y los sistemas están conectados por internet permitiéndoles enviar y recibir datos, para realizar los servicios de fabricación requeridos, aunque no necesariamente se requiere de las conexiones inteligentes entre los objetos físicos, sino también de la interacción entre las diferentes herramientas y las personas dentro de la fábrica digital [19].

3.3 MANUFACTURA ESBELTA

Con el cambiante mercado a lo largo de los años, las compañías han tomado el concepto de manufactura esbelta, ya que este sistema, sirve para facilitar la competitividad en varios segmentos, con el objetivo de eliminar residuos y también en la mejora de las condiciones de trabajo [17].

La manufactura esbelta es un concepto relativamente nuevo en la manufactura moderna que es reestructurada gradualmente, es la forma en que la industria en el mundo ve la producción. En otras palabras, es una filosofía revolucionaria de manufactura comparada con la producción en masa tradicional que se ha utilizado desde hace casi un siglo. Sin embargo el concepto de manufactura esbelta no es nuevo, ya que el origen de esta filosofía trasciende de Japón a finales de 1940 [18].

El concepto de manufactura esbelta originalmente fue diseñado para la producción en masa. Hoy en día un número creciente de empresas ponen en práctica los principios de manufactura esbelta en sus procesos de producción debido a las condiciones cambiantes, un mercado muy competitivo y al gran éxito del sistema de producción de Toyota en la década de 1970 [19].

Es un hecho muy claro y bien reconocido que la manufactura juega un papel muy importante en la sociedad hoy en día y es la columna vertebral de casi todas las industrias en el mundo. Por desgracias, los desechos industriales de fabricación pueden ser descritos como algo que no añade valor o algo que no es necesario, pero consumen recursos en términos de tiempo, dinero, mano de obra, espacio, etc. En general, los residuos son cualquier cosa que no proporcionan ningún beneficio a la empresa y pueden ser eliminado sin ningún efecto adverso sobre la calidad y la rentabilidad del producto final [18] [20].

En la **Figura 8** se muestran algunos tipos de tiempos y desechos en la manufactura esbelta tales como: sobreproducción, transporte, inventario, movilidad, defectos, exceso de procesado y tiempos de espera, son algunos de los puntos que provocan una pérdida importante de eficiencia dentro de la producción en masa en la industria [20].



Figura 8.- 7 Tipos de desecho en la manufactura esbelta [23].

Con la definición del concepto manufactura esbelta, este ha venido acompañado de los conceptos de “excelencia en fabricación” o “empresa de clase mundial”. El conocimiento de los objetivos que implican estos conceptos es muy conveniente el iniciarse en las nuevas técnicas, clave para la competitividad de las empresas. Desde el punto de vista de “excelencia” las empresas que desean competir con éxito en el mercado actual deben plantearse los siguientes objetivos [20]:

- Diseñar para fabricar.
- Reducir los tiempos de preparación de máquinas para incrementar la flexibilidad y disminuir los plazos de ejecución.
- Lograr una distribución de la planta que asegure un bajo inventario, minimice recorridos y facilite el control directo por visibilidad.
- Usar la tecnología para disminuir la variabilidad del proceso.
- Organizar el lugar de trabajo para eliminar tiempos de búsqueda.
- Garantizar que el personal de línea sea el primero en intentar solucionar los problemas.
- Garantizar que todas las personas estén regularmente informadas sobre las necesidades de los clientes, su grado de satisfacción y de los métodos a utilizar para su satisfacción.

3.4 MANUFACTURA DIGITAL

Manufactura se define como la acción o proceso de fabricación de algo, originalmente la fabricación se realizaba manualmente, pero la mayoría de las operaciones de fabricación modernas están altamente mecanizadas y automatizadas [23]. Con el rápido crecimiento tecnológico en la industria, los sistemas modernos de fabricación deben ser capaces de hacer frente a los desafíos, requisitos y restricciones que varían constantemente con las exigencias del nuevo mercado, así como también los ciclos de vida de los productos, ya que constantemente se requiere realizar cambios en las etapas de fabricación por lo que se tiene un tiempo muy corto para el diseño y la configuración del sistema de fabricación [24].

La manufactura digital es un proceso de fabricación, que con el apoyo de softwares y tecnologías tales como realidad virtual, redes informáticas, bases de datos y softwares de CAD, CAM, herramientas con las cuales se procesa la información acerca del producto y las necesidades del mercado, para realizar el diseño del producto y la simulación de las funciones necesarias en su fabricación y así poder satisfacer la demanda del cliente y los estándares de calidad en el menor tiempo posible [23].

El reciente cambio en las exigencias del mercado moderno a implicado el empleo de métodos y herramientas digitales como herramientas de bajo costo y con tiempos de análisis rápidos para investigar la complejidad y evaluar las diferentes configuraciones en los métodos y sistemas de fabricación [24] [25]. Las técnicas de simulación son una herramienta eficaz ya que permiten la experimentación y validación de los diferentes escenarios posibles y configuraciones, tanto en el diseño de sistemas de fabricación nuevos así como también la modificación de otros ya existentes, gracias a estas herramientas de simulación se pueden realizar los cambios en menor tiempo directamente en los modelos CAD y continuar con la simulación del modelo [26].

El ciclo de vida de los productos y plantas de producción requieren de una planificación desde el principio y este trabajo de planificación debe ser realizado por seres humanos, por lo que esto implica que la planificación este siempre sujeta a errores. El objetivo de la manufactura digital es asegurar el desarrollo de productos y procesos

en etapas tempranas, así como también la evolución del proceso de producción mediante el uso de modelos digitales de simulación [27] [28].

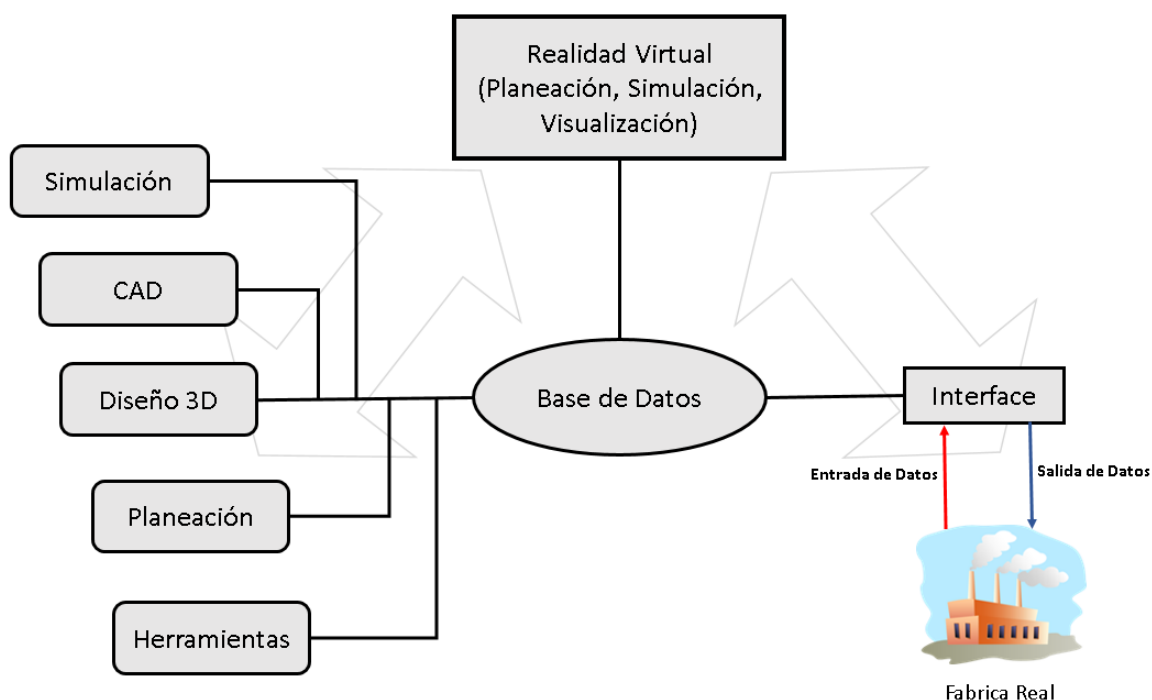


Figura 9.- Arquitectura básica de la fábrica digital (modificado [28]).

Una de las visiones de la manufactura digital, así como también del internet de las cosas es la integración de quipos, herramientas y personas en un solo sistema donde se pueda modificar y monitorear las distintas condiciones de operación desde cualquier parte del mundo y así obtener la fábrica digital, en la **Figura 9** se observa cómo es que se realiza la integración de métodos y herramientas disponibles en los diferentes niveles de planificación para realizar pruebas de producto y proceso de fabricación, con el fin de controlar la fábrica digital mediante la entrada y salida de información mediante la conexión a la red [29] [30].

La fábrica digital desarrollada durante la ingeniería debe ser integrada con la fábrica inteligente con sus datos en tiempo real e información estadística e inferida. Una capacidad significativa es la integración de la fábrica digital con la fábrica inteligente [30].

3.5 SISTEMA

En la actualidad generalmente la teoría del sistema define el concepto “sistema” como un conjunto bien ordenado y estructurado de elementos interrelacionados dentro del mismo sistema [21]. La expresión de las relaciones entre valores de entrada y de salida de los sistemas es logrado mediante el uso de conjuntos de valores asociados a los valores de entrada / salida o mediante el uso de funciones matemáticas.

El sistema está caracterizado por un conjunto de atributos asignados hacia el sistema estos pueden ser atributos estáticos que se caracterizan por ser valores fijos llamados parámetros del sistema y atributos dinámicos que reciben diferentes valores que son las variables descriptivas del sistema [31].

Para el estudio de los sistemas en general se ha desarrollado lo que se conoce como metodología sistemática, o conjunto de métodos mediante los cuales se abordan los problemas en lo que es dominante la presencia de sistemas. El análisis de un sistema consiste en el conocimiento al menos conceptual del sistema, para establecer las partes que lo forman. Sin embargo, el mero análisis de un sistema no es suficiente, no basta con saber cuáles son sus partes. Para comprender su comportamiento necesitamos saber cómo es que está integrado el sistema, cuales son los elementos y mecanismos mediante los que produce su coordinación. Se necesita saber cómo se produce la síntesis de las partes en el sistema [33].

Un sistema puede realizar una función que no es realizable por sus componentes individuales. Los componentes que conforman el sistema se denominan entidades, y se relacionan entre sí a través de relaciones o funciones. Estas relaciones pueden ser:

- Estáticas o estructurales.
- Dinámicas o funcionales.

Los valores asumidos por los atributos de las entidades en un momento dado determinan el estado del sistema, los estados del sistema pueden ser estático o estacionario lo que significa que se mantiene constante en el tiempo, por el contrario, puede ser dinámico o transitorio por lo que si evoluciona el tiempo.

En la siguiente **Figura 10** se muestran algunas de las diferentes formas de estudio de un sistema donde se puede observar, el desarrollo a seguir dependiendo el tipo de sistema y modelo que se está analizando, para llegar a una solución, así como también la creación de modelos de simulación.

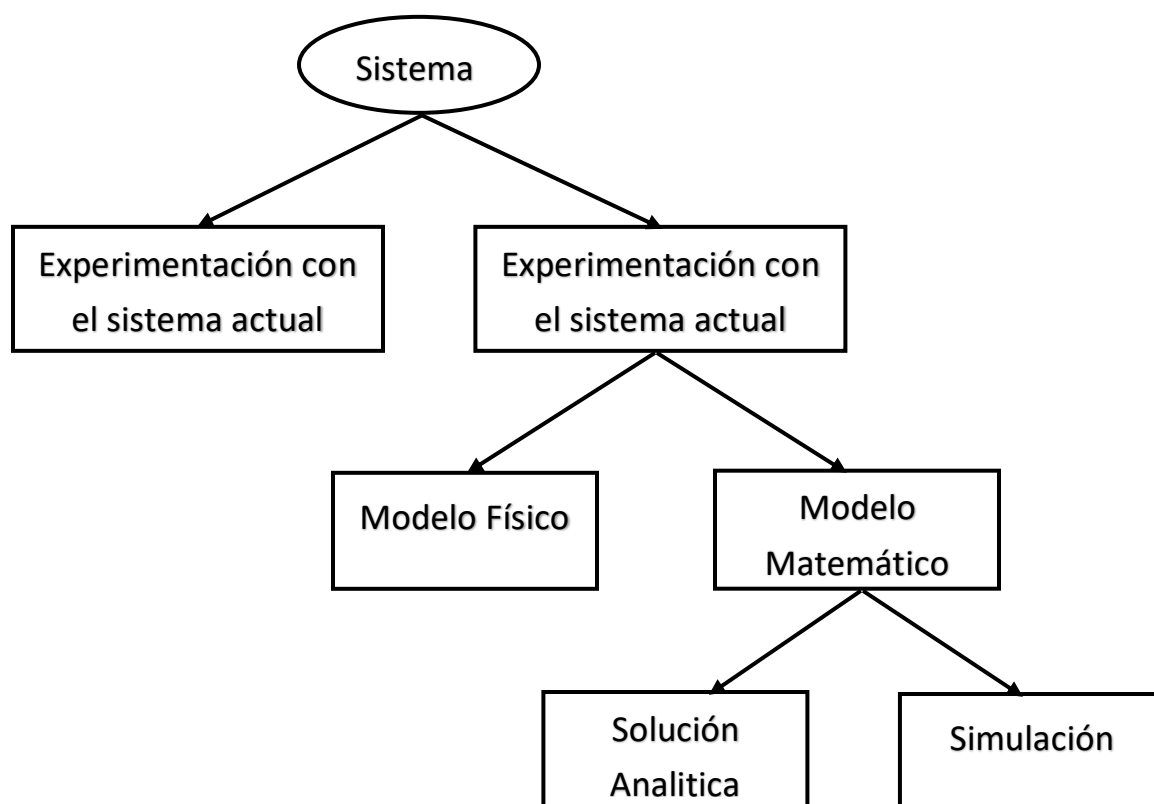


Figura 10.- Formas de estudio de un sistema [35].

3.5.1 TIPOS DE VARIABLES DEL SISTEMA

Una vez que es obtenida la información, tal como, parámetros de entrada del sistema real, se requiere convertirlos en información o datos de entrada del modelo de simulación de los cuales se puede distinguir dos tipos de información:

1. **Información determinística:** Esta información entra directamente al modelo con su valor correspondiente en el sistema real.
2. **Información probabilística:** Se requieren modelos de simulación que imiten el comportamiento de esas variables. Se debe ser capaz de recrear el comportamiento del sistema mediante el modelo de simulación. La metodología

consiste en la creación matemática de expresiones sencillas partiendo de lo que se conoce como generación de números aleatorios uniformes entre 0 y 1 [35].

Los atributos también se denominan variables o parámetros en la **Figura 11**, se muestran los tipos de variables que forman un sistema. Los parámetros (P) son atributos que se fijaron durante el diseño del sistema ya sea por el diseñador o por la naturaleza, las variables se clasifican a su vez en:

- **Variables de entrada o exógenas:** Son fijadas por el medioambiente del sistema. Pueden ser manipuladas (U) se fijan a voluntad o no (D).
- **Variables de salida (Y):** Son las variables de estado, o combinación de ellas, que son medidas o traspasan la frontera del sistema.
- **Variables internas:** Son las variables del sistema que no son ni, de entrada, ni de salida, ni parámetros.
- **Variables de estado (X):** Conforman el conjunto mínimo de variables internas del sistema necesarias para describir completamente su estado interno [36].

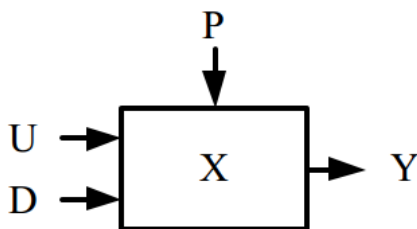


Figura 11.- Variables en un sistema [36].

3.5.2 TIPOS DE SISTEMAS

Un sistema puede ser clasificado de acuerdo a lo predecible que sea su conducta se clasifican en:

- **Determinístico:** Si el sistema no contiene ningún elemento aleatorio es un sistema determinístico. En este tipo de sistema, las variables de salida e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado. Es decir, las relaciones funcionales entre las variables del sistema están perfectamente definidas.

- **Estocástico:** En este caso algún elemento del sistema tiene una conducta aleatoria. Entonces, para entradas conocidas no es posible asegurar los valores de salida. En el mundo real, los sistemas siempre tienen elementos estocásticos ya sea por su propia naturaleza o porque son fenómenos no comprendidos actualmente. Sin embargo, se puede considerar a un sistema real con un sistema determinístico si su incertidumbre es menor que es menor que un valor aceptado.

De acuerdo a su evolución temporal:

- **Continuo:** Se tiene un sistema continuo cuando las relaciones funcionales entre las variables del sistema sólo permiten que el estado evolucione en el tiempo en forma (basta que una variable evolucione continuamente). Matemáticamente, el estado cambia en infinitos puntos de tiempo.
- **Discreto:** Se tiene un sistema discreto cuando las relaciones funcionales del sistema sólo permiten que el estado varíe en un conjunto finito (contable) de puntos temporales. Las causas instantáneas de los cambios de estados se denominan eventos. Un sistema continuo puede comportarse en forma discreta si las entradas son discretas. Los sistemas reales son combinaciones de sistemas continuos y discretos. La forma de tratarlos se adopta de acuerdo a la característica dominante [35] [2].

3.6 MODELO

El concepto de modelo es una representación de las características esenciales de un sistema, con el fin de determinar su comportamiento y la variación de los parámetros de entrada con los parámetros de salida [32].

Usualmente, su propósito es ayudar, explicar, entender o mejorar un sistema. Los modelos son útiles para:

- **El pensamiento:** Al construir un modelo necesariamente se debe ordenar y completar el conocimiento que del sistema real se posee.
- **La comunicación:** Un modelo elimina la ambigüedad del lenguaje para comunicarse con expertos.

- **La predicción:** Un modelo sirve para predecir la conducta del sistema real. El modelo de la teoría de la realidad predice, sin hacer una simulación, que no es posible superar la velocidad de la luz [34].

El modelado es un arte. El análisis del sistema a través de un modelo implica que la representación del sistema que constituye el modelo ha de ser una representación manipulable numéricamente. El ejercicio de construcción del modelo del sistema comienza por la construcción de un modelo conceptual del sistema, representación equivalente lógica aproximada del sistema real que, como tal, constituye una abstracción simplificada del mismo, que a continuación se traduce en un modelo apto para su ejecución en un ordenador [31].

Las ventajas inmediatas y principales de la utilización de modelos para estudiar el comportamiento de un sistema son:

- Menor coste y el tiempo de implementación, pruebas, y la experimentación.
- Facilidad de cambio de la estructura del modelo.
- Proporciona pistas sobre el cambio de comportamiento del sistema de origen, sobre la base de la variación en las variables consideradas en el estudio [32].

Cualquier conjunto de reglas para desarrollar modelos tiene una utilidad limitada y solo puede servir como una guía sugerida. El arte de modelar consiste en la habilidad para analizar un problema, resumir sus características esenciales, seleccionar y modificar las suposiciones básicas que caracterizan al mismo sistema, y continuar enriqueciendo y elaborando el modelo hasta obtener una aproximación útil [34].

El proceso de modelización o construcción del modelo implica:

- Identificación de las entidades principales del sistema y de sus atributos característicos.
- Identificación y representación de las reglas que gobiernan el sistema que se quiere simular.
- Captación de la naturaleza de las interacciones lógicas del sistema que se modeliza.

- Verificación de que las reglas incorporadas al modelo son una representación válida de las del sistema que se modeliza.
- Representación del comportamiento aleatorio [31].

Para enriquecerlo se procede de la forma contraria. Durante el proceso de modelado se debe alcanzar un equilibrio entre el grado de detalle y el riesgo de falta de exactitud. El mejor modelo es el modelo más simple que puede resolver el problema planteado con el grado de exactitud requerido.

Generalmente, simplificar un modelo implica:

- Convertir variables en constantes.
- Eliminar o combinar variables.
- Suponer linealidad.
- Agregar suposiciones más potentes y restricciones.
- Restringir los límites del sistema.

Teniendo en cuenta las etapas de construcción de un modelo, en la **Figura 12** se muestra el diagrama de la estructura básica de la teoría del modelado en donde se encuentran los tres pasos principales a seguir para realizar modelos de simulación y se engloban las etapas de construcción, para llegar desde un sistema real hasta el modelo básico y simplificado del sistema y poder realizar como paso final la simulación.

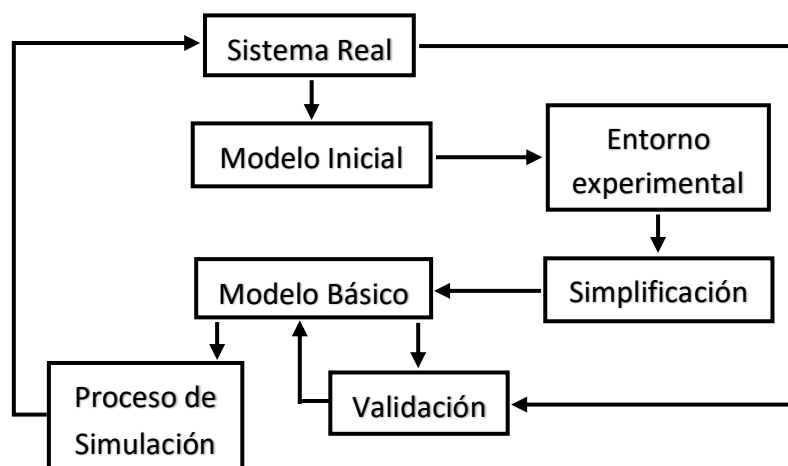


Figura 12.- Estructura básica de la teoría de modelado [32].

Un modelo debe ser:

- Fácil de entender por parte del usuario.
- Dirigido a metas u objetos.
- Sensato, en cuanto no de respuesta absurdas
- Fácil de manipular y controlar por parte del mismo usuario. Es decir, debe ser sencillo comunicarse con el modelo.
- Completo, en lo referente a asuntos importantes.
- Adaptable, con un sencillo procedimiento para modificar o actualizar el modelo.
- Evolutivo, debe ser sencillo al principio y volverse más complejo con el tiempo.

Como ya fue planteado, un modelo es también un sistema, por lo tanto, valen todas las definiciones y clasificaciones que se establecieron anteriormente. Debido a que un modelo es una simplificación o abstracción de un sistema real, no es necesario, salvo en los aspectos relevantes, que el modelo guarde una total correspondencia con el sistema real. Entonces, habrá casos en que será conveniente utilizar un modelo discreto para modelar un sistema continuo, o utilizar un modelo estocástico para modelar un sistema determinístico, y todas las combinaciones posibles [34].

3.6.1 MODELOS EXPERIMENTALES Y TEÓRICOS

Si el modelo que se construye solo se orienta a reproducir las salidas del sistema real sin intentar modelar su comportamiento interno; entonces, será un modelo experimental o de caja negra. En cambio, si el modelo también intenta reproducir las relaciones funcionales del sistema será un modelo con base teórica. Un modelo experimental requiere una gran cantidad de datos para poder calibrarlo o ajustarlo correctamente, y su rango de validez está limitado a este conjunto de datos. En contraposición, un modelo teórico requiere una cantidad menor de datos y puede ser utilizado fuera del rango de los mismos ya que el rango de validez del modelo está dado por la teoría utilizada y no por los datos [36].

3.6.2 MODELOS DE CAJA NEGRA

Debido a las limitaciones del conocimiento actual o por la complejidad involucrada, todo modelo con base teórica siempre tiene una parte con base empírica. En efecto, debido a que no existe una teoría apropiada o su implementación es demasiada compleja, siempre es necesario recurrir a experimentos para determinar el valor de algún parámetro o definir alguna relación entre las variables.

Cuando se desarrolla un modelo estadístico, se puede utilizar un sinnúmero de funciones teóricas de distribución, pero invariablemente será necesario determinar algún parámetro en forma experimental. El modelo de caja negra más simple es un polinomio. Si el orden del mismo ya está fijado, el problema se reduce a determinar los valores de los coeficientes que minimicen la sumatoria de los cuadrados de los errores. Si el orden del polinomio debe ser determinado, entonces el orden óptimo y los coeficientes surgen de minimizar la varianza de los errores de la muestra [34].

3.7 SIMULACIÓN

La palabra “simulación” proviene del latín “simulare”, durante casi tres siglos el significado directo de simulación en los idiomas Alemán, Inglés y Francés, se refiere a “imitación” o alternativamente a “engaño”, en el lenguaje cotidiano alguien simula cuando imita un cierto patrón de comportamiento [33]. La simulación es el desarrollo de un modelo lógico-matemático de un sistema, de tal forma que se obtiene la imitación de una operación a través del tiempo de algún proceso de la vida real o de un sistema.

Las simulaciones se pueden realizar a mano o en computadora, la simulación involucra la generación de un escenario artificial que representa un sistema, con la observación de los escenarios de simulación, la manipulación experimental, nos ayuda a inferir las características operacionales de tal sistema [34].

El proceso simulado generalmente es llamado sistema y para estudiarlo científicamente a menudo tenemos que hacer un conjunto de suposiciones sobre cómo funciona. Estas suposiciones, que usualmente toman la forma de relaciones matemáticas

o logísticas, constituyen un modelo que se utiliza para tratar de obtener un cierto entendimiento de cómo se comporta el sistema correspondiente [35].

El desarrollo de la humanidad, a lo largo de la evolución histórica, se basa en actividades continuas y específicas para el conocimiento de su entorno. El conocimiento acumulado con el tiempo se utilizó para lograr los saltos necesarios en el progreso de la civilización (en cada etapa histórica del desarrollo de la sociedad humana). El proceso de conocimiento del medio fue logrado a través del enfoque de operaciones específicas, en las proximidades y la reconstrucción de la realidad. En los tiempos modernos las actividades que han predominando han sido basadas en la observación y medición de aspectos particulares del entorno con la inmediata finalidad de facilitar la existencia humana. Con la evolución histórica de la civilización humana la observación y medición a lo largo del tiempo nos han provisto de un gran número de información. Este proceso permitió el estudio de ellos, así como la observación de las bien establecidas particularidades (su repetitividad), dependiendo del fenómeno estudiado. Lógicamente, el siguiente paso era establecer los patrones que se pueden asignar a otros fenómenos, con resultados predecibles [32] [33].

La construcción de modelos mentales para la simulación de algún proceso para obtener conclusiones o tomar decisiones acerca del acontecimiento se denomina simulación mental. Cuando la simulación se torna compleja para ser analizada mentalmente se requiere de simulaciones realizadas en un ordenador ya que esto facilita la realización de modelos óptimos [33].

Las simulaciones son una herramienta apropiada de análisis, aunque en muchas ocasiones, es preciso considerar ventajas y desventajas en la utilización de estas herramientas.

Ventajas

- Los modelos realizados pueden ser modificados de manera rápida para el análisis de diferentes escenarios.

- El realizar cambios en el modelo de simulación representa un costo menor que llevarlo a cabo directamente en el sistema real
- Se facilita la observación y comprensión del comportamiento en los modelos de simulación que en los modelos analíticos.
- Con los modelos de simulación por computadora se pueden realizar análisis a sistemas complejos, ya que el procesamiento de datos y parámetros es mayormente controlado por una computadora y no se requiere de métodos analíticos, estos solo se realizan a sistemas relativamente sencillos.
- En algunos casos, la simulación es el único medio para lograr una solución.

Desventajas

- Algunos modelos de simulación son costosos y requieren de mucho tiempo de desarrollo y validación, ya que requieren de un análisis extenso por la complejidad de su sistema.
- Se requiere simular la mayor cantidad de escenarios posibles para encontrar las soluciones optimas lo cual repercute en altos costos.
- El resultado de las simulaciones no siempre se asemeja a la realidad ya que pueden variar factores en la operación o el analista no consideró los aspectos y condiciones necesarias para realizar el análisis y el planteamiento del modelo de simulación [38].

Hoy en día la simulación está presente en casi todas las áreas de trabajo posibles ya que se pueden simular los distintos sistemas y podemos predecir su comportamiento, algunas de estas áreas son:

- Procesos de manufactura: Se puede detectar cuellos de botella en las líneas de producción, así como también la distribución del personal en planta y el flujo de material dentro de la producción.

- Plantas industriales: Se puede obtener las condiciones óptimas de operación de las líneas de producción, así como también elaborar planes de control y emergencia.
- Sistemas públicos: Se puede predecir la demanda energética y realizar planes de contingencia ambiental anticipados, prediciendo el comportamiento del clima.
- Sistema de transporte: Se puede detectar las zonas de congestionamiento, así como también realizar rutas estratégicas y evitar zonas con riesgo de accidentes.
- Diseño: Permite el estudio de las distintas formas que se pueden utilizar en una estructura, para realizar una selección de materiales y probar el comportamiento de cada uno de ellos y utilizar el material adecuado en base a los resultados obtenidos.
- Educación: Con la simulación de sistemas se puede estudiar y comprender el comportamiento de los sistemas, ya que el análisis se puede centralizar en un área en específico, detener el tiempo y recopilar información de las variables que no pueden ser medidas en el sistema real.
- Capacitación: Las personas pueden utilizar los simuladores para aprender por si mismas a realizar una actividad u operar ciertos equipos, ya que el costo y el riesgo son casi nulos [2].

3.7.1 TIPOS DE SIMULACIÓN

Existen varios tipos simulaciones y estas dependerán de la naturaleza del modelo empleado y el tipo de sistema del cual se realizó el modelo, estas simulaciones se muestran a continuación:

- **Identidad:** Se utilizan modelos que son una réplica exacta del sistema real.
- **Cuasi-identidad:** Se utiliza una versión ligeramente simplificada del sistema real.
- **Laboratorio:** Se utilizan dos tipos de simulación y estos modelos son bajo condiciones controladas.

- **Juego operacional:** Donde las personas forman parte del modelo y las computadoras se encargan de recolectar y analizar la información generada por cada participante.
- **Hombre-Máquina:** En este tipo de simulación las personas también forman parte del modelo, solo que en este tipo de simulación se busca estudiar la relación maquina operador y no solo la persona genera información, sino que la maquina también.
- **Simulación por computadora:** Este tipo de modelo se realiza en un lenguaje computacional, en el que las personas quedan excluidas del modelo, este tipo de simulación a su vez puede ser:
 - **Digital:** Se utiliza una computadora digital.
 - **Analógica:** Se utiliza una computadora análoga, también se pueden incluir las simulaciones que utilizan modelos físicos [40].

3.7.2 MODOS DE SIMULACIÓN

Cuando se simula se experimenta con un modelo que se ha creado y simplificado a partir de un sistema por lo que de acuerdo al tipo de variables de salida los diferentes modos serán (**Figura 13**):

- **Análisis:** Es de los modos más empleados, en las variables de salida del modelo representan a las variables de salida del sistema real. Este modo se utiliza para estimar el funcionamiento del sistema simulado ante las entradas específicas. Este tipo de modelo es más estable ya es una representación de un sistema funcional por lo que se asegura un resultado final.
- **Diseño:** En este modo las salidas del modelo representan a los parámetros del sistema real. Se utiliza este modo en la etapa de diseño cuando se quiere determinar los parámetros de funcionamiento para los cuales el sistema producirá las salidas deseadas para las entradas específicas.
- **Control:** Este modo se utiliza cuando se quiere determinar las condiciones de operación de un sistema, ya que nos sirve para determinar los valores que deberán adoptar las entradas para producir los resultados deseados por lo que en este modo las salidas del modelo representan las entradas del sistema real [36].

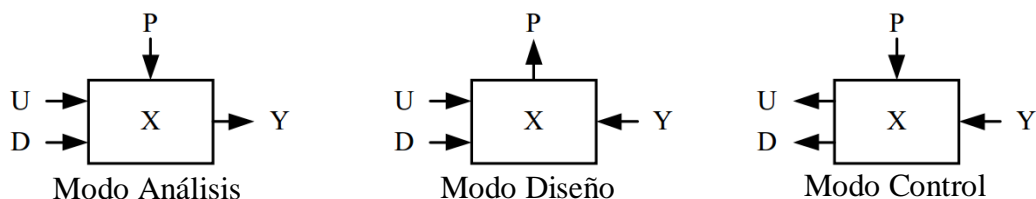


Figura 13.- Modos de simulación [36].

3.7.3 ETAPAS DE DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN

Para la creación de modelos de simulación existe una serie de pasos y normas que rigen el desarrollo de la metodología que se debe seguir, la cual se puede resumir con un diagrama de flujo mostrado en la **Figura 14**, la cual incluye los siguientes pasos:

1. **Definición del sistema:** Todo estudio debe comenzar con una descripción del problema o del sistema. Si se tiene una descripción ya definida, el analista debe asegurarse que se encuentre completa. Es decir, que exista una correcta identificación del objetivo, de las variables de decisión, las restricciones, la media efectiva y las variables no controlables y su comportamiento estadístico.
2. **Análisis del sistema:** Deben describirse las interacciones lógicas entre las variables de decisión, de tal suerte que se optimice la medida de efectividad en función de las variables no controlables, sin olvidar las restricciones del sistema. Con el fin de analizar un sistema, es indispensable definir algunos términos. El estado de un sistema es el conjunto de variables que definen al sistema en cualquier instante. Un evento representa un acontecimiento instantáneo que modifica el estado del sistema. Una actividad representa el tiempo requerido para llevar a cabo una operación. Una entidad es cualquier objeto dentro del sistema, esta entidad puede ser estática o dinámica, en este último caso se denota como una transacción y su principal característica es su movimiento a través de las entidades estáticas del sistema. Las entidades contienen propiedades llamadas atributos que permiten crear diferencias entre ellas. Por ejemplo, si definimos al sistema como una celda flexible de manufactura, las transacciones son los pallets que se mueven a través del sistema transportando el material dentro de la celda; los atributos pueden ser el tipo de pieza en el pallet, el peso de los pallets. Las actividades son las operaciones de procesamiento y transporte; las entidades

estáticas son las máquinas de control numérico o los robots; los eventos son la llegada o salida de un pallet de cada estación en la celda y finalmente las variables de estado son el número de pallets esperando en cada estación o el número de estaciones ocupadas.

3. **Formulación del modelo:** Consiste en generar un código lógico- matemático que defina en forma exacta las interacciones entre las variables; debe ser una definición sencilla pero completa del sistema. Al generar las interacciones es importante tener en cuenta que se va a llevar a cabo a través del tiempo y que el uso de listas o cadenas de eventos darán la pauta en el manejo de las variables. Una lista es un arreglo en el que se van ordenando las transacciones de acuerdo con la secuenciación de eventos en el tiempo. Existen dos tipos de listas, las llamadas de eventos futuros donde la secuencia depende del tiempo de ocurrencia del evento, y las de eventos actuales cuya secuenciación depende de la ocurrencia de otro evento.
4. **Selección del lenguaje:** De la selección de lenguajes dependerá el tiempo de desarrollo del modelo de simulación, es importante utilizar el lenguaje que mejor se adecuó a las necesidades de simulación que se requiera. La selección puede ser desde usar un lenguaje general como lo es BASIC, PASCAL o FORTRAN hasta hacer uso de un paquete específicamente desarrollado para simular sistemas de manufactura como SIMFACTORY o STARCEL.
5. **Codificación del modelo:** Consiste en generar las instrucciones o código computacional necesario para lograr que el modelo pueda ser ejecutado en algún tipo de computadora. La duración de este proceso es directamente proporcional con el lenguaje seleccionado.
6. **Validación del modelo:** Es el proceso que tiene como objetivo determinar la habilidad que tiene un modelo para representar la realidad. La validación se lleva a cabo mediante la comparación estadística entre los resultados del modelo y los resultados reales.
7. **Experimentación:** En este paso se determinan las diversas alternativas que pueden ser evaluadas, seleccionando las variables de entrada y sus diferentes niveles con la finalidad de optimizar las variables de respuesta del sistema real.

El uso de técnicas como diseño de experimentos, superficies de respuesta, Simplex EVOP, permiten llevar a cabo este procedimiento en forma estructurada.

8. **Implantación:** Una vez seleccionada la mejor alternativa, es importante llevarla a la práctica; en muchas ocasiones este paso es el más difícil ya que se tienen que convencer a la alta dirección y al personal de las ventajas de esta puesta en marcha. Para esto se recomienda llevar a cabo un proceso de animación que permite visualizar el comportamiento de las variables en el sistema.
9. **Monitoreo y control:** No hay que olvidar que los sistemas son dinámicos y con el transcurso del tiempo es necesario modificar el modelo de simulación, ante los nuevos cambios del sistema real, con el fin de llevar a cabo actualizaciones periódicas que permitan que el modelo siga siendo una representación del sistema [35] [41].

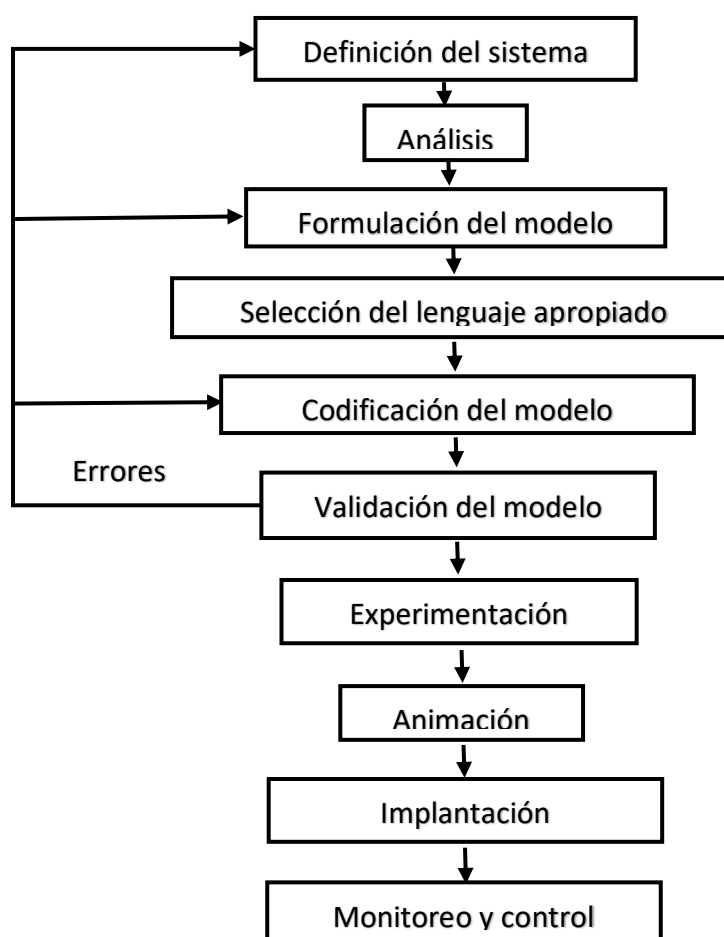


Figura 14.- Etapas de desarrollo de un modelo de simulación [35].

3.7.4 RELACIÓN ENTRE SISTEMA, MODELO Y SIMULACIÓN

Para el desarrollo de un modelo de simulación se tiene que tomar en cuenta la relación que tiene el modelo y el sistema sobre el cual se realizara el análisis, los modelos de simulación están conformados por suposiciones y simplificaciones de las líneas o elementos de trabajo, hay que tomar en cuenta las 6 actividades primordiales, algunas de las cuales ya fueron mencionadas anteriormente [38] [39].

1. **Información histórica:** Se refiere a la búsqueda física de bibliografía o documentación donde se encuentre información referente al tema que se trata de comprender y analizar.
2. **Generación de variables aleatorias:** Es la realización del modelo matemático donde se deben de considerar la mayor cantidad de variables sobre el comportamiento del sistema y realizar la validación estadística de los parámetros de operación.
3. **Generación del modelo computacional:** Con la relación matemática entre las variables de entrada y salida del sistema se realiza el modelo computacional, donde su representación se realiza mediante una tabla de eventos y su codificación en el lenguaje más adecuado de acuerdo al sistema, el tiempo de desarrollo de cada modelo computacional dependerá de la magnitud del problema, del grado de detalle que se desee obtener y del lenguaje seleccionado al tipo de sistema.
4. **Ejecución del modelo:** Consiste en el manejo del modelo con el fin de que nos arroje resultados similares a la realidad, tomando en cuenta las condiciones iniciales, el tiempo de estabilización de las variables y la ejecución de varias réplicas.
5. **Validación de resultados:** Se realiza la comparativa entre los resultados obtenidos del modelo y el sistema real, la validación se puede realizar a nivel de medias, variancias, forma de las distribuciones y correlación.
6. **Diseño de experimentos:** Una vez que el modelo es validado, se comienza a experimentar con el fin de optimizar el modelo de simulación, se realiza

mediante el cambio de parámetros en las variables de entrada y observando el comportamiento de las variables de salida [38].

Realizando un resumen sobre la relación que existe entre los términos sistema, modelo y simulación en el diagrama mostrado en la **Figura 15** se observa, que cada uno va de la mano conforme se realiza la simulación de un proceso, del lado izquierdo se tiene el mundo real donde existen infinidad de sistemas los cuales se pueden simular para poder obtener los mejores parámetros de operación, entonces a partir de un sistema real o en desarrollo, se debe obtener la mayor información posible sobre variables y condiciones de operación para llegar a conocer el tipo de sistema que se quiere simular, y continuar con la creación del modelo simulación, donde se integren las variables e información recabada del sistema, requerimientos y condiciones, esto para tener un panorama bastante amplio sobre el sistema y poder descartar o incluir funciones y parámetros que no se tuvieran considerados, teniendo esta información detallada y precisa se continua por realizar la simplificación y validación del modelo para conocer si el modelo es el óptimo o se tiene que realizar una regresión y retroalimentación del sistema hasta llegar al optimo y como punto final mostrado en el diagrama del lado derecho el modelo de simulación terminado. La relación que tienen estos términos es considerando que en cada etapa de elaboración de un modelo de simulación se tiene una serie de pasos y etapas las cuales se deben considerar dependiendo los tipos de sistemas, modelos y simulaciones ya que cada uno de estos es aplicado a diferentes áreas de trabajo.

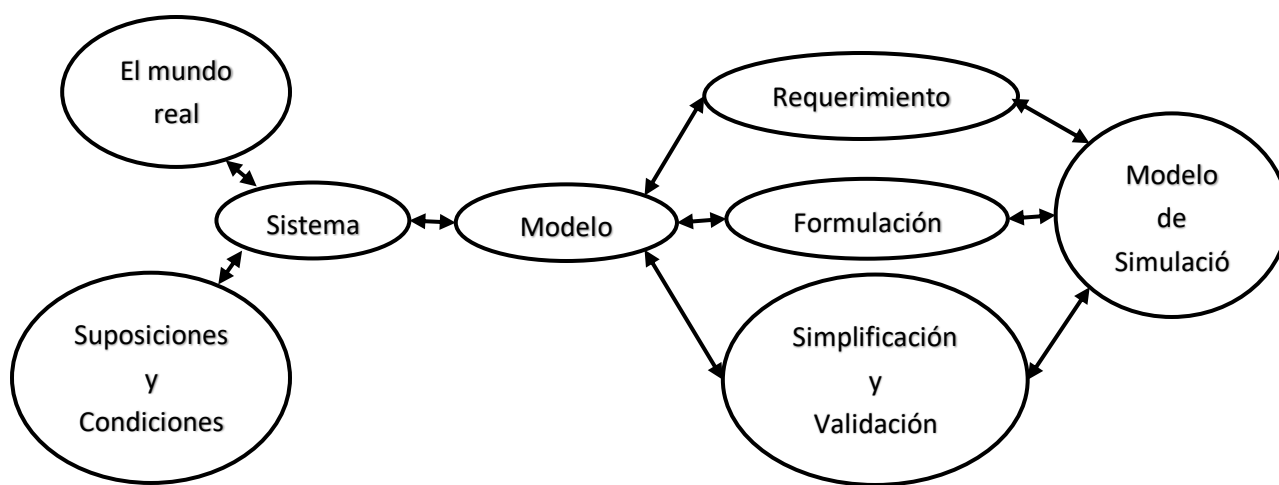


Figura 15.- Relación entre sistema, modelo y simulación (modificado [41]).

3.8 SIMULACIÓN POR EVENTOS DISCRETOS

Este tipo de simulación es una evaluación por computadora del modelo de un sistema dinámico de eventos discretos, donde la operación del sistema es representada como una secuencia cronológica de eventos y el sistema dinámico es descrito por un estado de transición interno [42].

La simulación por eventos discretos se refiere al modelado de un sistema a medida que avanza el tiempo, por una representación en la que las variables de estado cambian instantáneamente en puntos separados en el tiempo. Evento se define como un estado cambiante continuamente, una ocurrencia instantánea que puede cambiar el estado del sistema. La simulación de eventos discretos podría ser conceptualmente realizada mediante cálculos, pero la cantidad de datos que deben almacenarse y manipularse para la mayoría de los sistemas dicta que las simulaciones de eventos discretos se realizan en un ordenador digital [43].

Una posibilidad consiste en considerar que el sistema evoluciona en el tiempo cambiando de estado, y que simular consiste en ser capaz de imitar los cambios de estado del sistema emulando su evolución, ello requiere definir qué se entiende por estado del sistema y como cambia de estado el sistema. Se puede definir el estado del sistema como el número de unidades que hay en el sistema en un momento dado. Entonces el sistema se encuentra en el estado n en el instante t si en ese instante hay n unidades en el sistema, contándolas que esperan en la cola a recibir servicio y las que están recibiendo servicio en ese momento. Con estas especificaciones del sistema es evidente que el sistema cambia de estado cada vez que llega a él una nueva unidad para recibir servicio, o cada vez que llega a él una nueva unidad para recibir servicio, o cada vez que una unidad ha terminado de recibir servicio y lo abandona [32].

Es evidente que los sistemas productivos evolucionan a lo largo del tiempo y, por lo tanto, debe tenerse en cuenta su naturaleza dinámica. Por otra parte, aunque determinados sistemas productivos pueden ser considerados como continuos la mayoría de los sistemas productivos tienen características de sistemas discretos, ya que los

cambios de estado se producen en instantes de tiempo determinados y separados entre sí [44].

Para el desarrollo de un modelo de eventos discretos de un sistema, se tiene que tomar en cuantos algunos conceptos importantes, los cuales se mencionan a continuación:

- **Sistema:** A la serie de objetos o personas que interactúan entre sí a lo largo del tiempo.
- **Modelo:** Es una representación abstracta del sistema, el cual usualmente contiene una relación estructural, lógica o matemática, y describe al sistema en términos de estado, entidades y atributos.
- **Estado del sistema:** Una colección de variables que contienen toda la información necesaria para describir el sistema en cualquier momento.
- **Entidad:** Cualquier objeto o componente en el sistema que requiere representación explícita en el modelo, por ejemplo, un servidor, un cliente, una maquina).
- **Atributos:** Las propiedades que tiene cada entidad.
- **Lista:** Es una colección de entidades asociadas (permanentes o temporales), ordenadas de alguna manera lógica.
- **Evento:** Una ocurrencia instantánea que cambia el estado de un sistema.
- **Registro de Eventos:** Un registro de eventos o acontecimientos que se produzcan en el momento o que ocurran en el futuro, junto con los datos que los asocian al sistema, el registro incluye el tipo de evento y la hora.
- **Lista de Eventos:** Una lista de eventos futuros, ordenados por tiempo de ocurrencia.
- **Actividad:** Se refiere a la duración de tiempo definido en las actividades o movimientos del sistema, por ejemplo, un tiempo de servicio o un tiempo de entrega.
- **Retraso:** Una duración de tiempo indefinida, que no se conoce cuando terminara.
- **Reloj:** Una variable que representa el tiempo de simulación [2].

3.8.1 TRAYECTORIA DE MODELO DE SIMULACIÓN

Un modelo ejecutable de un sistema también llamado modelo de simulación contiene variables de entrada, las cuales realizan una trayectoria y fijan los límites y parámetros al modelo esta trayectoria simple se muestra en la **Figura 16**, donde se tiene que q es el almacenamiento de piezas dentro del sistema listas para ser manipuladas, m es la maquina u operación donde se le realizara alguna operación a la pieza y con respecto a t_a y t_s , denotan las secuencias de tiempos de llegada y los tiempos de servicio respectivamente, entonces tenemos que $Q(t)=\{q(t), m(t)\}$, indicaran la trayectoria del sistema.

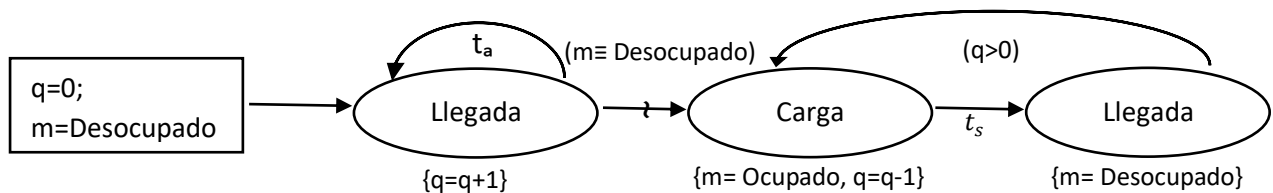


Figura 16.- Grafica de trayectoria dinámica de un modelo de simulación (modificado[45]).

3.8.2 TIEMPO EN SISTEMAS DISCRETOS

En los modelos de simulación por computadora el tiempo es una variable continua, esto ciertamente corresponde a la noción básica de tiempo en el mundo físico. Esto permite desarrollar modelos basados en ecuaciones diferenciales, por lo tanto, existen varias razones por las que se puede adoptar este enfoque.

1. Cualquier computadora digital que se utilice como componente de un sistema funciona de manera discreta, es decir, está equipada con un reloj interno de tiempo discreto, por lo que cualquier variable que el ordenador reconozca o controle será evaluada solamente en instantes de tiempo.
2. Muchas ecuaciones diferenciales de modelos de tiempo continuo solo pueden resolverse numéricamente mediante el uso de una computadora. Tales soluciones generadas por un ordenador son en realidad versiones en tiempo discreto de funciones de tiempo continuo. Por lo tanto, comenzar con modelos de tiempo discreto es razonable si las soluciones definitivas estarán en esta forma de todos modos.

3. Técnicas de control digital, que se basan en modelos de tiempo discreto, a menudo ofrecen una considerable flexibilidad, velocidad y bajo costo. Esto se debe a los avances en el hardware digital y la tecnología informática.
4. Algunos sistemas son inherentes de tiempo discreto, tales como modelos económicos basados en datos que se registran sólo en intervalos discretos regulares.

Mecanismos de Avance del Tiempo:

- Intervalos de tiempo variables.
- Intervalos de tiempo fijo.

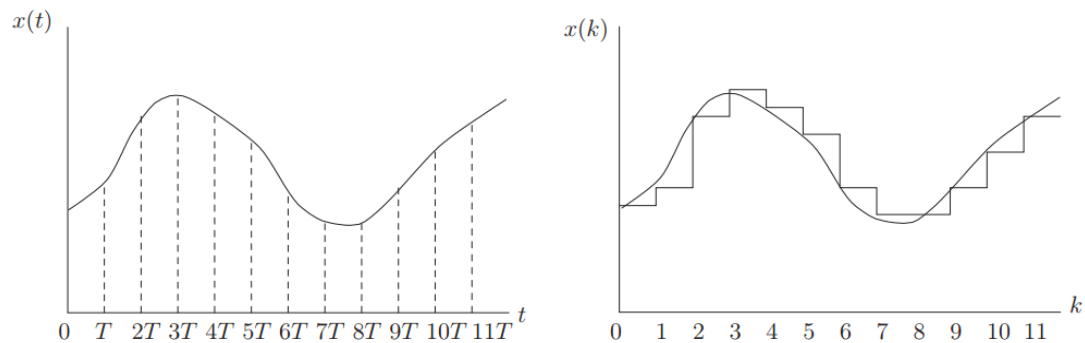


Figura 17.- Tiempo en modelos de simulación continuos y discretos.

En los modelos de tiempo discreto, la línea de tiempo se piensa como una secuencia de intervalos definidos por una secuencia de puntos $t_0 < t_1 < \dots < t_k < \dots$. Se supone que todos los intervalos son de igual longitud T , es decir, $t_{k+1} - t_k = T$ para todo $k = 0, 1, 2, \dots$. La constante T se denomina a veces el intervalo de muestreo. La variable real es entonces remplazada por una variable entera k , que cuenta el número de intervalos transcurridos desde un punto de referencia dado, usualmente $k = 0$.

En la **Figura 17** se ilustra cómo se puede realizar el muestreo de tiempo continuo $x(t)$ para obtener una vía de muestra de tiempo discreto $x(k)$, con el periodo de muestreo T . Es importante observar que la discretización de tiempo no implica discretización del espacio entre estados. La ruta de muestra de tiempo discreto es constante, pero el estado todavía puede tomar cualquier valor en el conjunto de números reales, como en el caso de tiempo continuo.

3.9 SOFTWARES DE SIMULACIÓN

Los softwares utilizados para desarrollar modelos de simulación se pueden dividir en tres categorías, en la primera están los lenguajes de programación de uso general como C, C++ y Java, en segundo lugar, se tiene que existen lenguajes de programación de simulación, como *GPSS/HTM*, *SLAM II[®]* y *SIMAN V[®]*, y en tercer lugar los entornos de simulación. Esta categoría incluye muchos productos que se distinguen de una manera u otra (por ejemplo, costo, área de aplicación o tipo de animación), estos tienen características comunes, como una interfaz gráfica de usuario y entorno que admite todos (o la mayoría) de aspectos de un estudio de simulación. Muchos entornos de simulación contienen un lenguaje de programación de simulación, pero algunos adoptan un enfoque gráfico similar al diagrama de flujo de proceso. Muchos paquetes de simulación ofrecen técnicas de optimización basadas en algoritmos genéticos, estrategias evolutivas, búsqueda de dispersión, y otros métodos heurísticos recientemente desarrollados. Además del soporte para análisis estadístico y optimización, los entornos de simulación ofrecen gestión de datos, definición de escenarios y gestión de ejecución. La gestión de datos ofrece soporte para gestionar todos los datos de entrada y salida asociados a los análisis [2].

El elemento clave para correr este tipo de simulaciones es una plataforma de emulación disponible para realizar simulaciones de plantas completas de trabajo en tiempo real.

El mundo de la simulación es dominado por una gran variedad de productos tales como TechnomatixTM and DelmiaTM y algunos más pequeños tales como FlexSim[®]. Estos sistemas contienen una gran librería de elementos de manufactura, que permiten el rápido desarrollo de modelos de plantas de trabajo en 3D. Estos también incluyen interfaces gráficas para fijar un control de flujo en tiempo real, así como también algunos de estos cuentan con la posibilidad de conectarse con algunos PLC específicos para realizar su control [4].

3.9.1 PLANT SIMULATION®

Plant Simulation® es una herramienta de simulación de eventos discretos. En otras palabras, una simulación dinámica de los procesos de fabricación a lo largo del tiempo. Plant Simulation® nos ayuda a realizar experimentos estocásticos (parcialmente impredecibles) de plantas de fabricación, así como también para el modelado estadístico de instalaciones donde el rendimiento, las restricciones de capacidad de las máquinas y demás restricciones son importantes (**Figura 18**) [47].

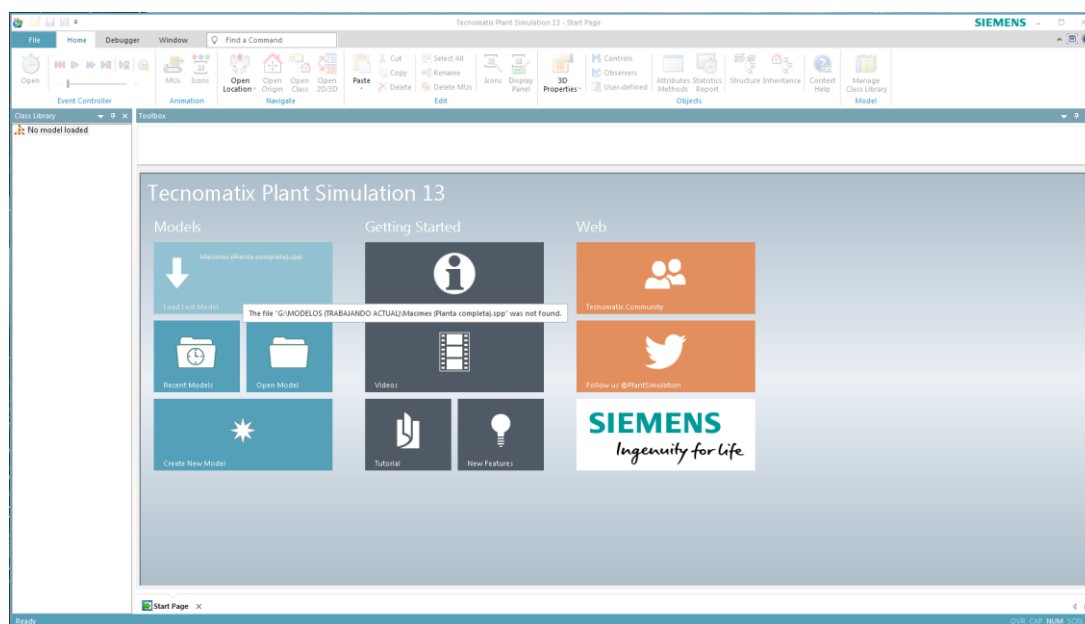


Figura 18.- Software de simulación Plant Simulation®.

Plant Simulation® es una aplicación orientada a objetos: los objetos heredan propiedades de objetos primarios. Con la estructura orientada a objetos se puede tener mayor flexibilidad y facilidad a la hora de mantenimiento a modelos complejos y cambiantes. Los modelos están formados por una colección de unidades (objetos) que actúan entre sí, cada objeto puede recibir, procesar y enviar datos. Cada objeto puede ser visto como una pequeña maquina independiente o actor con un papel o una responsabilidad distinta. Los objetos simples se pueden utilizar como bloques de construcción para crear objetos más complejos, esto se llama herencia.

En las simulaciones de eventos discretos solo se muestran los cambios de estados de los elementos que componen el modelo en ciertos momentos del tiempo, no continuamente en el tiempo. Cuando se producen ciertos eventos, ciertos componentes del modelo cambian su estado y controlan así la simulación. Plant Simulation® considera estos eventos de forma discreta, paso a paso. La principal ventaja de este enfoque es que Plant Simulation® omite el tiempo entre eventos [47].

De acuerdo a la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI por sus siglas en alemán) la norma VDI 3633, define en consecuencia que, la simulación es un procedimiento para la reproducción de un sistema con procesos dinámicos en un modelo experimental, para llegar a realizaciones que son transferibles a la realidad. Esta norma está destinada a los usuarios de la tecnología de simulación (planificadores, proveedores de equipos, operadores, proveedores de servicios) involucrados en la preparación, ejecución y evaluación de estudios de simulación para la investigación de logística, flujo de material y sistema de producción.

Plant Simulation® esta desarrollado a partir de simulación por vénets discretos y de acuerdo a la norma de VDI 3633, en la cual se desarrollan una serie de pasos para realizar una simulación los cuales se mencionan a continuación [48].

1. Formulación del problema

Junto con el cliente de la simulación, el experto en simulación debe formular los requisitos para la simulación. El resultado del problema formulado debe ser un acuerdo por escrito, que contiene problemas concretos que serán estudiados usando simulación.

2. Evaluación de la simulación

Para evaluar la validez de la simulación puede, por ejemplo, examinar:

- La falta de modelos matemáticos analíticos.
- La alta complejidad, de los factores a considerar.
- Datos inexactos.
- Exploración gradual de los límites del sistema.

- Uso repetido del modelo de simulación.

3. Formulación de objetivos

Cada empresa tiene un sistema de objetivos con el cual se quiere llegar a una mejor y mayor producción. Los objetivos frecuentes para las simulaciones son, por ejemplo:

- Minimizar el tiempo de procesamiento.
- Maximizar la utilización de equipos y sistemas de producción.
- Minimizar Inventario.
- Aumentar la entrega en el tiempo.

Todos los objetivos definidos deben ser recogidos y analizados estadísticamente al final de los ciclos de simulación, lo que implica un cierto nivel de detalle requerido para el modelo de simulación. Por lo tanto, estos determinan el rango del estudio de simulación.

4. Recopilación de datos

Los datos necesarios para el estudio de simulación pueden estructurarse de la siguiente manera:

- Datos de carga del sistema.
- Datos organizacionales.
- Datos técnicos.

5. Modelado

La fase de modelado incluye la construcción y prueba del modelo de simulación.

El modelo de simulación generalmente consta de dos etapas:

- Derivar un modelo icónico del modelo conceptual.
- Transferir el modelo a un modelo de software.

6. Ejecución de la simulación

Dependiendo de los objetos del estudio de simulación, se realizarán los experimentos basados en el plan más adecuado. En el plan de prueba se determinan los experimentos individuales sobre los datos de salida, los argumentos del modelo, los objetivos y los resultados esperados. También es importante definir un intervalo de tiempos para los experimentos de simulación, basado en los resultados de las pruebas. Las simulaciones por computadora que abarcan varias horas o frecuentes experimentos repetitivos para la cobertura estadística no son infrecuentes. En estos casos es útil comprobar si es posible controlar los experimentos simulando en intervalos de tiempo o en simulaciones por partes. Los datos de entrada y salida, así como los parámetros subyacentes del modelo de simulación, deben documentarse para cada experimento.

7. Análisis e interpretación de resultados

Los valores, que cambiaran en el sistema modelado, se derivaran de los resultados de la simulación. La interpretación correcta de los resultados de la simulación influye significativamente en el éxito de un estudio de simulación. Si los resultados contradicen las suposiciones hechas, es necesario analizar que influencias son responsables de los resultados inesperados. También es importante darse cuenta de que los sistemas complejos a menudo tienen una fase de aceleración. Esta fase puede funcionar de manera diferentes en la realidad y en la simulación. Por lo tanto, los resultados obtenidos durante la fase de ascenso a menudo no son transferibles al sistema modelado y pueden no tener influencia en la evaluación.

8. Documentación

Para la documentación de un estudio de simulación, se recomienda la forma de un informe de proyecto. La documentación debe proporcionar una visión general del momento del estudio y documentar el trabajo realizado. De interés en este contexto es la documentación de las variantes y constelaciones fallidas del sistema. El núcleo del informe del proyecto debe ser una presentación de los

resultados de la simulación basada en la especificación del requisito del cliente. Como resultado del estudio de simulación, tiene sentido incluir propuestas de acciones en la documentación. Por último, se recomienda describir el modelo de simulación en términos de su estructura y funcionalidad [48].

CAPÍTULO 4

DESARROLLO EXPERIMENTAL

4.1 METODOLOGÍA

Para realizar el modelo de simulación del proceso de recuperación de arena para fundición es importante conocer y separar las partes en las que se dividirá el desarrollo experimental del modelo de simulación, por lo que se optó por realizar la separación en dos etapas las cuales se muestran en la **Figura 19**, primeramente, se realizó el modelo de simulación del flujo del proceso de recuperación, el cual consistió en recopilar información acerca del funcionamiento del sistema, los elementos que se utilizan y las variables del sistema, para posteriormente con esta información poder realizar los primeros modelos de simulación y con estos realizar la simplificación del modelo hasta llegar al modelo de simulación óptimo y más acercado al objetivo principal, posteriormente, ya con el modelo de simulación terminado, se continuo con la segunda etapa del desarrollo del proyecto, esta consistió en realizar la digitalización de cada uno de los elemento que conforma la planta actualmente, para posteriormente realizar el ensamble de todos los elementos, con esto se tendrán las dimensiones que estos ocupan y se podrá realizar el acomodo de los elementos estratégicamente en el espacio proporcionado, donde se llevara a cabo la implantación del sistema, además de que cada elemento digitalizado se utilizara para importarlo en el modelo de simulación para realizar una visualización 3D del proceso con los elementos reales, por lo que al finalizar el proyecto se tendrá el modelo de simulación de los flujos de trabajo y la visualización 3D del mismo y por otra parte el modelo 3D en el software de CAD.

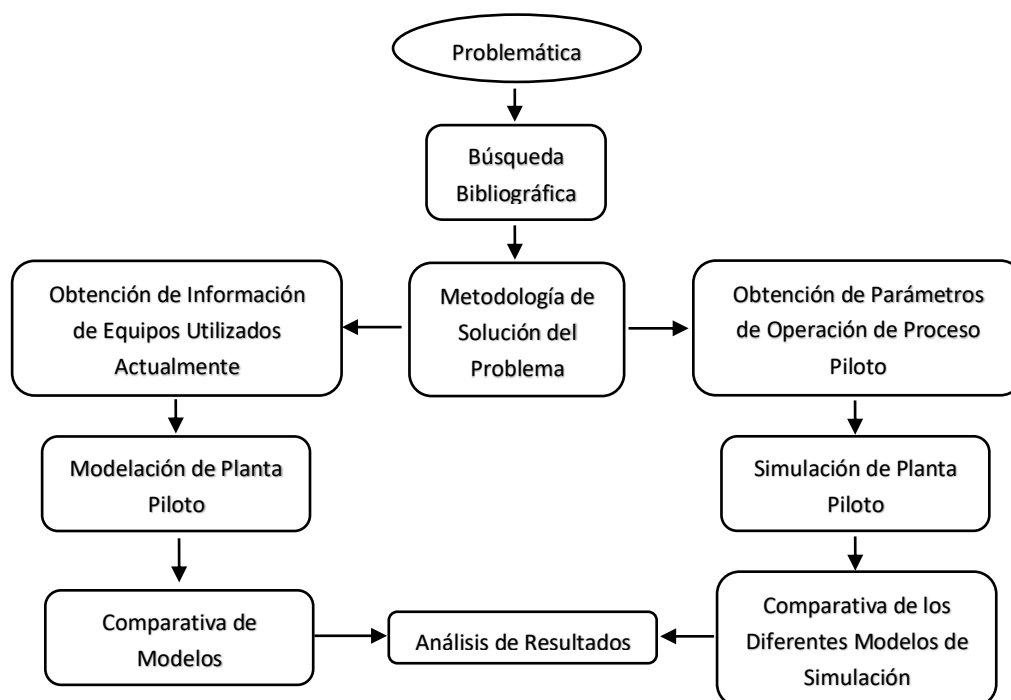


Figura 19.- Desarrollo experimental del modelo de simulación.

Como se mencionó anteriormente, primeramente se comenzó por realizar el modelo de simulación del proceso de recuperación, ya que principalmente el objetivo en esta simulación es obtener los parámetros de operación del sistema, para conocer el comportamiento que esta tendrá una vez puesta en marcha y posteriormente realizar el modelo 3D, con el cual se realicen los planos de construcción y se pueda visualizar como lucirá la planta piloto en funcionamiento, para realizar estos modelos se utilizara el software especializado en simulación de procesos de manufactura Plant Simulation® y el digitalizado 3D de los elementos se realizara en el software de diseño Nx® ambos softwares de Siemens®.

Con la metodología y normas para la simulación de procesos de manufactura, se realizó el análisis de los elementos que conforman el sistema, así como también la información acerca de los componentes y las variables de entrada y salida del sistema, esto para realizar el primer modelo de simulación del flujo. Por lo que se comenzó por realizar un diagrama el cual se muestra en la **Figura 20**, este contiene la metodología que se utiliza para realizar modelos de simulación de procesos de manufactura, basada en simulación por eventos discretos, que es la metodología mediante la cual está

desarrollado el software utilizado, en el diagrama se puede observar cómo se relacionan los puntos claves en la elaboración de un modelo de simulación, desde el análisis del sistema hasta la implementación y documentación del modelo de simulación finalizado.

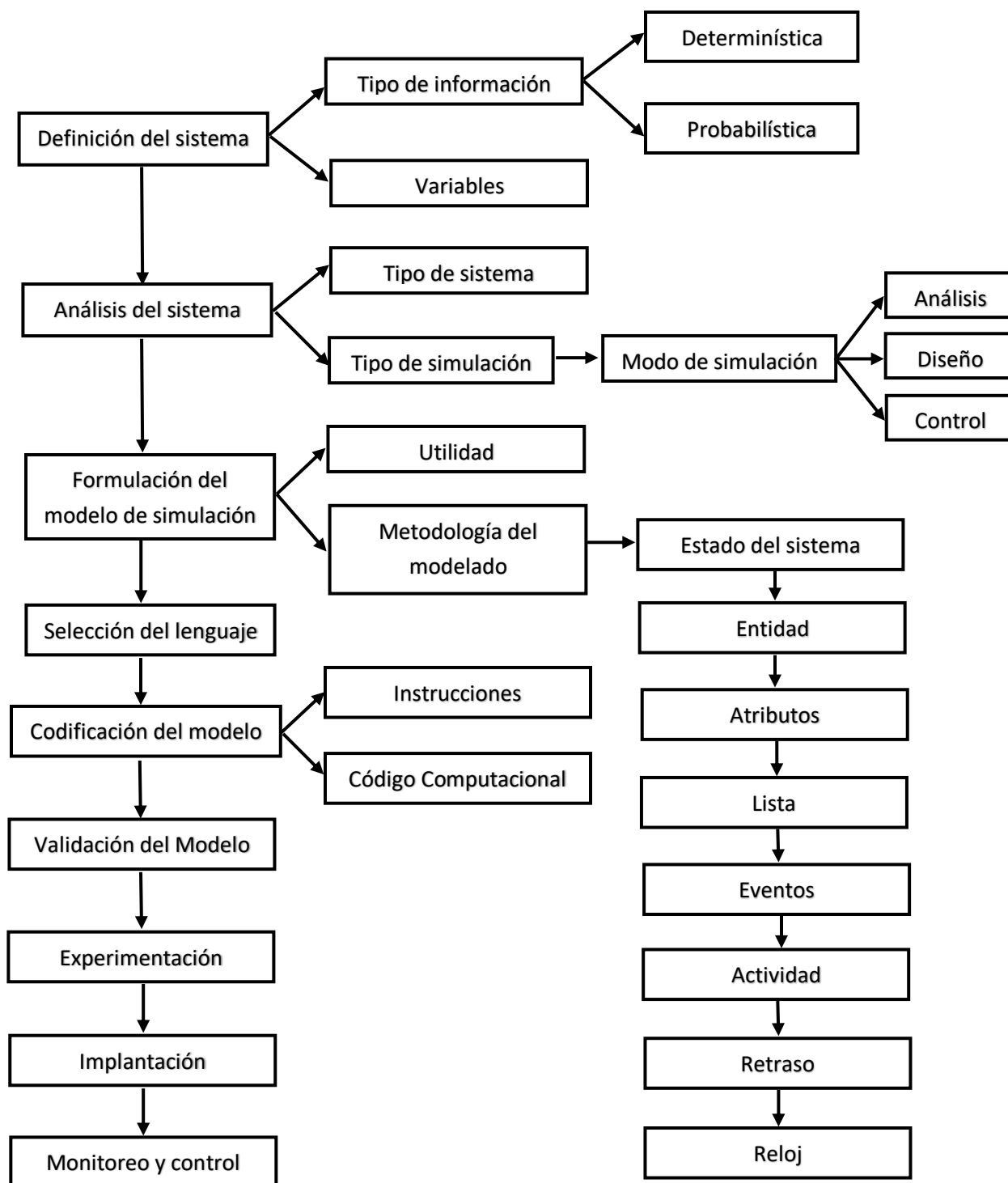


Figura 20.- Metodología para realizar modelos de simulación de procesos de manufactura.

4.2 DESARROLLO DEL MODELO DE RECUPERACIÓN EN PLANT SIMULATION®

4.2.1 DEFINICIÓN DEL SISTEMA

El sistema para la recuperación de arena para fundición, es un proceso nuevo el cual se quiere implementar para reutilizar la arena que ha sido utilizada para la fabricación de moldes y corazones en la fundición de pieza de aluminio. Para definir el sistema sobre el cual se realizara el modelo de simulación se analizaron primeramente tres puntos clave, los cuales definen el funcionamiento y comportamiento del sistema, siendo estos las variables del sistema, los elementos que conforman el sistema y los materiales que se utilizaron para realizar el ciclo de recuperación, a continuación en la **Figura 21** se definen las variables de entrada y salida del sistema siendo estas, 6 variables de entrada, las cuales en conjunto y a través de tuberías y tanques de almacenamiento se mezclan y realizan el ciclo de lavado y recuperación de la arena para su posterior secado y reutilización, por otra parte, se tienen 3 variables principales de salida, ya que también se tienen perdidas de algunos materiales que se utilizan en la tapa de recuperación.

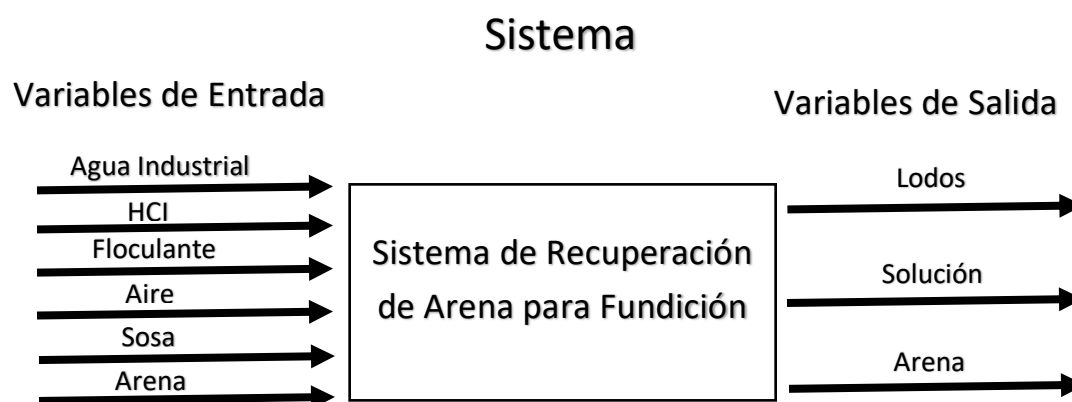


Figura 21.- Variables de entrada y salida del sistema de recuperación de arena.

Teniendo definidas las variables del sistema a continuación, se recopiló información sobre los elementos que se utilizaron para dar forma al sistema, estos se muestran en la **Tabla 3**, donde se observa algunas de las características, capacidades y cantidad de equipos que se utilizan.

Tabla 3.- Elementos utilizados en el sistema de recuperación

Cantidad	Equipo	Informacion
1	Reactor de lavado/ejuague	Capacidad: 1000L
2	Banda Transportadora	Banda 1: 12”ancho * 3m largo Banda 1: 12”ancho * 2.25m largo
1	Horno Rotatorio	Diametro: 0.5m Largo: 3.05m
1	Quemador	Calor: 150000BTU’s Tipo de gas: LP
1	Mezclador (Agitador)	Trasmiccion: Sencilla de Engranés Motor: Electrico
1	Tanque de almacenamiento	Tipo: Estandar Capacidad: 2500L
2	Tanque de almacenamiento	Tipo: Reforzado 20% Capacidad: 2500L
2	Tanque de almacenamiento	Tipo: Estandar Capacidad: 1100L
3	Tanque de almacenamiento	Tipo: Reforzado 40% Capacidad: 250L

Con los elementos que conforman el sistema se continuó por conocer los materiales que se utilizaran para realizar el lavado de la arena ya que estos forman parte de las variables del sistema y la variación en estos contribuye en el comportamiento del sistema, estos se muestran en la **Tabla 4.**

Tabla 4.- Materiales utilizados en el proceso de lavado.

No.	Material
1	Agua Industrial
2	HCl al 30%
3	Floculante al 0.1%
4	Sosa al 50%
5	Arena
6	Aire

4.2.3 FORMULACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

El sistema contara con tres niveles en los que se ubicaran los distintos elementos, se utilizara la altura a la que estarán algunos de los tanques de almacenamiento para que su funcionamiento de vaciado sea por gravedad contribuyendo, a utilizar menor cantidad de recursos y elementos para el funcionamiento del sistema y dado que el espacio que se tiene disponible para realizar el montaje de la planta piloto es reducido se realizó el acomodo de los elementos estratégicamente logrando obtener el mayor beneficio del espacio disponible. En la **Tabla 5** se muestran los elementos por nivel, así como la función de cada uno de los elementos.

Tabla 5.- Equipos utilizados por nivel

Equipos 1er Nivel	Equipos 2do Nivel	Equipos 3er Nivel
<ul style="list-style-type: none"> • Banda alimentadora de arena seca a reactor • Tolva descarga de arena húmeda • Banda de alimentación a horno rotatorio • Horno rotatorio • Tanque de 2.5m³ para precipitados de lavado • Tanque de 1.1m³ para precipitados de enjuague • Tanque de 0.25m³ para HCl 	<ul style="list-style-type: none"> • Banda alimentación de arena seca a reactor • Reactor de lavado/enjuague • Mezclador (agitador de arena/agua) 	<ul style="list-style-type: none"> • Tanque de 2.5m³ para solución acida • Tanque de 2.5m³ para agua industrial • Tanque de 0.25m³ para sosa. • Tanque de 0.25m³ de floculante • Tanque de 1.1m³ para agua recuperada de enjuague

Teniendo separado los equipos que se utilizarán por nivel, se continuó por analizar el flujo y las funciones que tendrán por nivel cada uno de los equipos del sistema, en la **Figura 23** se observa un diagrama de flujo de los elementos que se encuentran en el primer nivel, así como el flujo de material que estos tendrán.

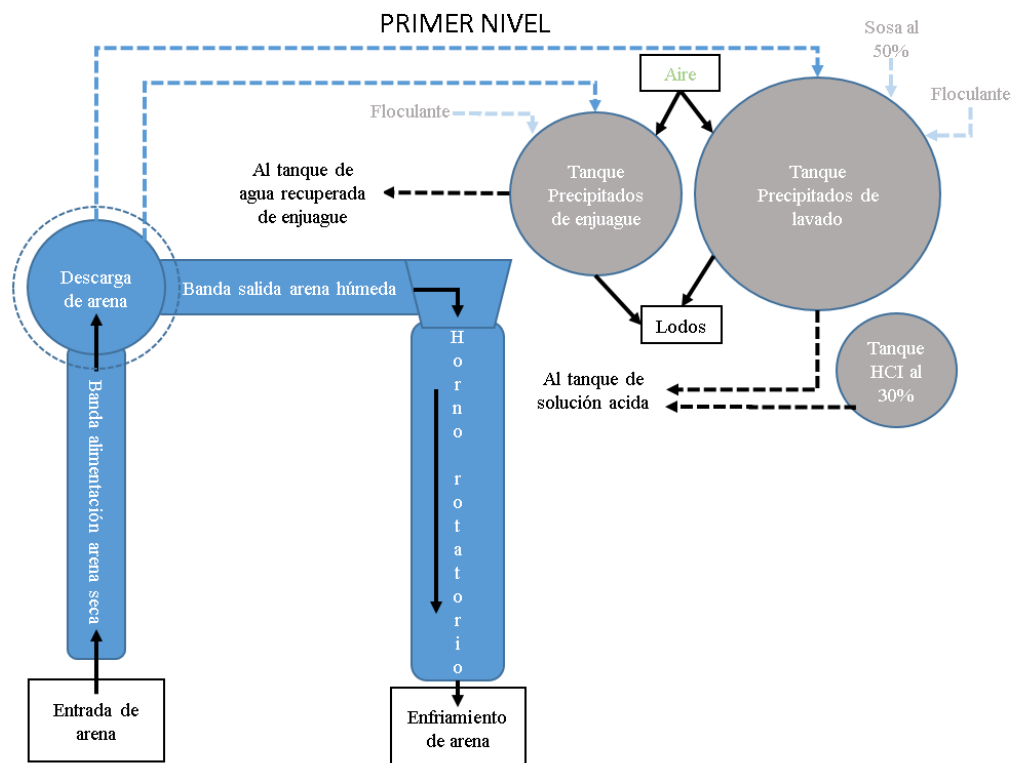


Figura 23.- Flujo de material por equipos del primer nivel.

En la **Tabla 6** se muestra la función que tendrá cada elemento que se encuentra en el primer nivel.

Tabla 6.- Función de quipos del primer nivel.

No.	Equipo	Función
1	Tanque de precipitados de lavado	<ul style="list-style-type: none"> Entrada de aire para agitación del tanque. Entrada de agua de lavado del reactor. Entrada de Sosa. Entrada de Floculante. Salida de agua recuperada de lavado a tanque de solución acida. Salida de lodos.
2	Tanque de precipitados de enjuague	<ul style="list-style-type: none"> Entrada de aire para agitación del tanque. Entrada de agua de enjuague del reactor. Entrada de floculante.

		<ul style="list-style-type: none"> • Salida de agua recuperada de enjuague a tanque de agua de enjuague recuperada. • Salida de lodos.
3	Banda para arena seca	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de arena por recuperar. • Salida de arena seca a reactor.
4	Banda para arena húmeda	<ul style="list-style-type: none"> • Desviador (tolva) para salida de arena húmeda de reactor a banda. • Salida de arena húmeda a desviador (tolva) para alimentar a horno rotatorio.
5	Horno rotatorio	<ul style="list-style-type: none"> • Alimentación de arena húmeda desde reactor por banda. • Salida de arena seca y caliente a tolva
6	Tanque de HCl al 30%	<ul style="list-style-type: none"> • Salida de ácido al tanque de solución acida.

En el diagrama mostrado en la **Figura 24** se observa el diagrama de flujo de los elementos que estarán en el segundo nivel, y el flujo de material que estos tendrá.

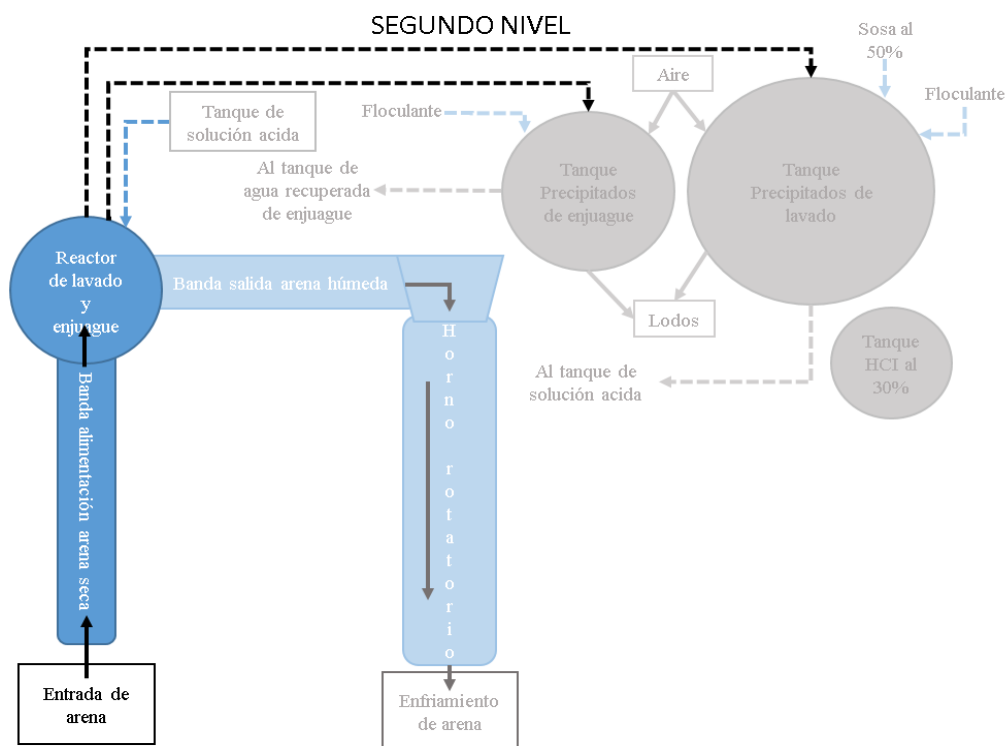


Figura 24.- Flujo de material por equipos del segundo nivel.

En la **Tabla 7** se muestra la función que tendrá cada elemento que se encuentra en el segundo nivel.

Tabla 7.- Función de equipos del segundo nivel.

No.	Equipo	Función
1	Banda para arena seca	<ul style="list-style-type: none"> Entrada de arena por recuperar. Salida de arena seca a reactor.
2	Reactor	<ul style="list-style-type: none"> Entrada de arena a recuperar. Entrada de solución acida. Salida de agua después de lavado a tanque de precipitados de lavado. Salida de agua después de enjuague a tanque de precipitados de enjuague.
3	Mezclador	<ul style="list-style-type: none"> Solo controlar el nivel de agua y arena en el reactor. Controlar velocidad de agitador para evitar derrames.

En el diagrama mostrado en la **Figura 25** se observa el diagrama de flujo de los elementos que estarán en el tercer nivel, y el flujo de material que estos tendrán.

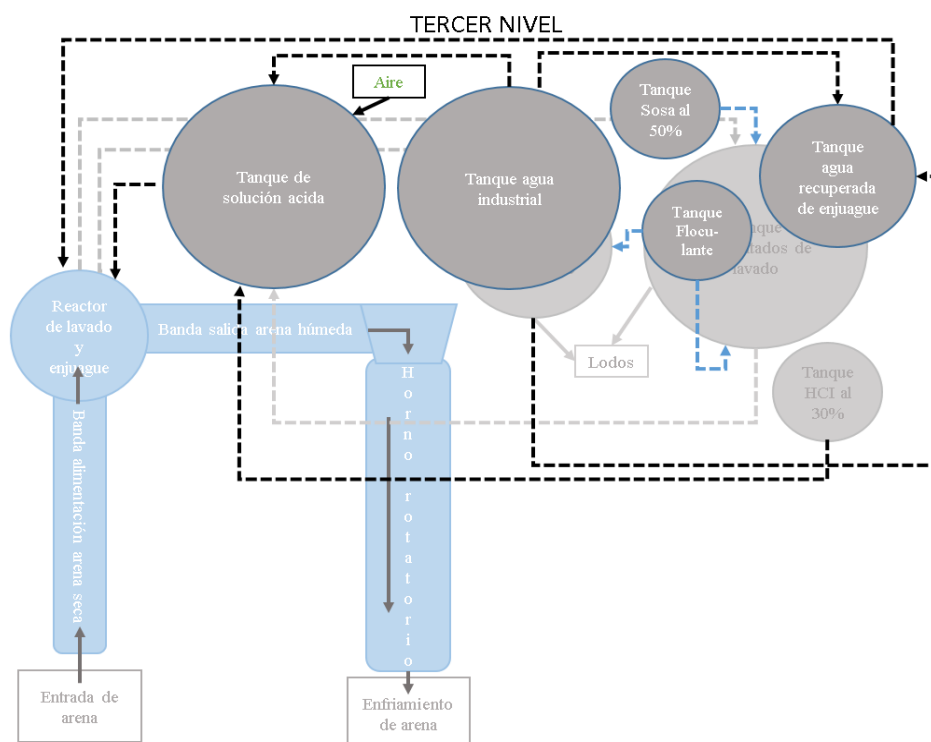


Figura 25.- Flujo de material por equipos del tercer nivel.

En la **Tabla 8** se muestra la función que tendrá cada elemento que se encuentra en el tercer nivel.

Tabla 8.- Función de equipos del tercer nivel.

No.	Equipo	Función
1	Tanque de solución acida	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de aire para agitación del tanque. • Entrada de agua industrial del tanque y/o agua recuperada de lavado. • Entrada de HCl al 30%. • Salida de agua acida al reactor.
2	Tanque de agua industrial	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de agua industrial. • Salida de agua al tanque de solución acida. • Salida de agua al tanque de recuperación de agua de enjuague.
3	Tanque de agua recuperada de enjuague	<ul style="list-style-type: none"> • Entrada de agua industrial. • Entrada de agua desde el tanque de precipitados de enjuague. • Salida de agua al reactor para enjuague.
4	Tanque de sosa al 50%	<ul style="list-style-type: none"> • Salida de sosa al tanque de precipitados de agua de lavado.
5	Tanque de Floculante	<ul style="list-style-type: none"> • Salida de floculante al tanque de solución acida.

Definidos los elementos de cada nivel, las conexiones y el flujo de materiales que habrá entre los elementos, por ultimo queda realizar la descripción del proceso de recuperación, así como también los tiempos que toma realizar las operaciones en las diferentes etapas del proceso.

El proceso de recuperación se realizará mediante el método químico llamado NERIS, desarrollado por la empresa para la recuperación de arena para fundición, el cual se utilizará para obtener los parámetros de operación de la planta piloto y con el cual se llevará a cabo el desarrollo del modelo de simulación del proceso.

A continuación, se describen las 6 etapas principales en las cuales se divide el proceso NERIS, así como también la descripción de cada una de las etapas.

1. Preparación de solución acida.

- Adicionar 600 L de agua del tanque de precipitados de lavado y/o del tanque de agua industrial al tanque de solución acida.
- Activar la inyección de aire dentro del agua para mantener una agitación continua.
- Inyectar en forma lenta y continua el HCl concentrado al tanque de solución acida, hasta el volumen requerido, mientras esta en agitación, por cada 100 L de agua agregar 360 mls de HCl concentrado. Dejar en agitación por espacio de 10 min.

2. Lavado.

- Adicionar 300 Kg de arena inorgánica al tanque de lavado/enjuague.
- Adicionar 600 L de solución acida al tanque de lavado/enjuague.
- Agitar la mezcla por 60 min.
- Al terminar el tiempo de agitación, dejar reposar la mezcla por 3 min.
- Drenar el agua del tanque de lavado/enjuague al tanque de precipitados de lavado.
- En el tanque de precipitados de lavado abrir inyección de aire y adicionar 1.5 L de Sosa al 5% por cada 100 L de agua.
- Adicionar el floculante “920A al 0.1%”, al tanque de precipitados de lavado, 1.5 L por cada 100 L de agua y agitar con aire por 5 min.
- Suspender la agitación con aire y dejar reposar el líquido por al menos 1hr.
- Después de 1 h enviar el agua limpia al tanque de lavado/enjuague.

3. Primer Enjuague.

- Adicionar 300 L de agua del tanque de agua de enjuague recuperada al tanque de lavado/enjuague, sobre la arena lavada.
- Agitar la mezcla por 30 min.
- Al terminar el tiempo de agitación, dejar reposar la mezcla por 3 min.

- Drenar el agua del tanque de lavado/enjuague al tanque de precipitados de enjuague y esperar hasta que esté listo el segundo enjuague.

4. Segundo Enjuague.

- Adicionar 300 L de agua del tanque de agua de enjuague recuperada al tanque de lavado/enjuague, sobre la arena del primer enjuague.
- Agitar la mezcla por 15 min.
- Al terminar el tiempo de agitación, dejar reposar la mezcla por 3 min.
- Drenar el agua del tanque de lavado/enjuague al tanque de precipitados de enjuague sobre la misma agua del primer enjuague.
- Adicionar el floculante “920A al 0.1%”, al tanque de precipitados de enjuague, 1.5 L por cada 100 L. de agua y agitar con aire por 5 min.
- Suspender la agitación con aire y dejar reposar el líquido por al menos 1 hr.
- Después de 1 hr enviar el agua limpia al tanque de agua de enjuague recuperada.

5. Secado de Arena.

- Retirar la arena del tanque de lavado/enjuague y enviarla al horno rotatorio para el secado.
- Colocar el horno rotatorio en posición de giro continuo.
- Encender el quemador del horno rotatorio y esperar a que la temperatura de las paredes sea mayor a 120 °C.
- Adicionar la arena lentamente al interior del horno hasta que se termine el contenido del tanque de lavado/enjuague.

6. Enfriamiento de Arena Seca.

- Dejar la arena reposar a temperatura ambiente hasta su enfriamiento.

Solo queda definir los tiempos de cada operación del proceso de recuperación, los tiempos obtenidos para la recuperación de solución de lavado, enjuague, así como también los tiempos de espera para la eliminación de lodos y sedimentos, son establecidos mediante el método NERIS para la recuperación de arena para fundición.

En la siguiente **Tabla 9** se muestran los tiempos de las operaciones del proceso de recuperación.

Tabla 9.- *Tiempos de las operaciones del ciclo de recuperación.*

Proceso	Operación	Tiempo
1. Preparación de solución acida.	Adición de agua industrial y HCl al tanque de solución acida. Agitación de mezcla con aire.	10 min
2. Lavado	Adicionar la arena y la solución acida al tanque de lavado/enjuague.	15min
	Lavado de arena.	60min
	Reposar mezcla en tanque lavado.	3 min
	Drenar el agua del tanque de lavado/enjuague al tanque de precipitados de lavado.	5min
	Adicionar Sosa al 5% y floculante “920A al 0.1%” al tanque de precipitados de lavado.	10 min
	Agitar mezcla del tanque de precipitados de lavado.	5 min
	Dejar reposar mezcla del tanque de precipitados de lavado y regresar agua a tanque de solución acida.	60 min
3. Primer Enjuague	Adicionar agua del tanque de agua de enjuague recuperada al tanque de lavado/enjuague.	12 min
	Agitar mezcla de tanque de lavado/enjuague.	30min
	Reposar mezcla de tanque de lavado/enjuague.	3 min
	Drenar el agua al tanque de precipitados de enjuague.	5 min
	Adicionar agua del tanque de agua de enjuague recuperada al tanque de lavado/enjuague.	12min
	Agitar mezcla del tanque de lavado/enjuague.	15min
	Reposar mezcla de tanque de	3min

4. Segundo Enjuague	lavado/enjuague.	
	Drenar el agua al tanque de precipitados de enjuague, sobre la misma agua del primer enjuague.	5min
	Adicionar floculante al 0.1% al tanque de precipitados de enjuague.	10min
	Agitar mezcla del tanque de precipitados de enjuague.	5min
	Dejar reposar mezcla del tanque de precipitados de enjuague y regresar agua a tanque de agua de enjuague recuperada.	60min
5. Secado de arena	Retirar la arena del tanque de lavado/enjuague y enviarla al horno rotatorio para el secado.	15min
	Encender el horno rotativo y quemador.	15min
	Secar arena en horno rotativo.	60min
	Retirar arena de horno rotativo.	5min
6. Enfriamiento de arena seca.	Dejar reposar a temperatura ambiente hasta su enfriamiento.	60min

Con los datos obtenidos sobre funcionamiento y operación del sistema de recuperación, se realizó un análisis grafico en una línea de tiempo (**ver Anexo 1**), donde se observa en cada punto de la gráfica las operaciones y las funciones que tendrán cada uno de los tanques de almacenamiento del sistema, conforme avanza el ciclo de recuperación y en el eje x se observa el tiempo en minutos de la duración de cada operación, con esto se tiene un panorama más amplio del funcionamiento y la secuencia del sistemas, con las diferentes operación y el tiempo que llevara realizarlas y completar el ciclo de recuperación. A continuación, se describe el procedimiento para realizar el primer modelo de simulación en Plant Simulation® y la creación de la interfaz del diagrama de flujo del sistema con la información que se describió anteriormente.

Para realizar el modelo de simulación se comenzó realizando el diagrama de flujo del sistema en 2D, donde se agregó cada elemento de la planta y las tuberías que servirán como conexión entre cada parte del proceso de almacenamiento de líquidos, así como también la conexión de los elementos mecánicos del sistema, en la **Figura 26** se observa un ejemplo de la representación de un diagrama de flujo de una línea de manufactura en 2D, donde está representado el avance de la pieza de trabajo entre procesos y bandas transportadoras así como también la presencia de personal encargado de realizar las operación,

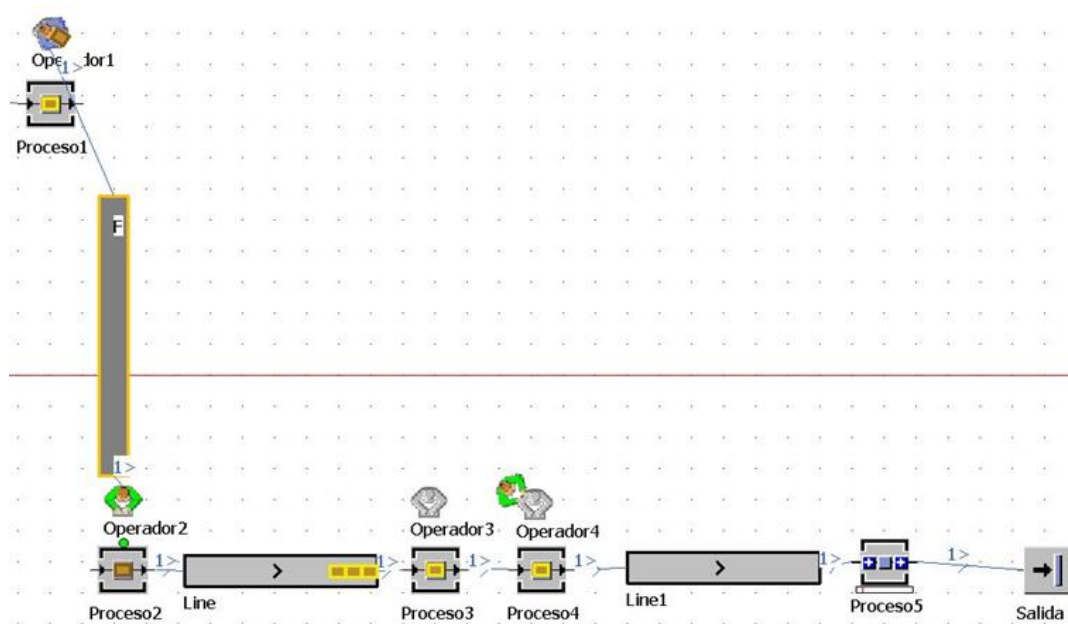


Figura 26.- Principios de Simulación de Proceso en 2D.

Se comenzó realizando el primer acomodo de los elementos básicos que conforman el sistema, tales como estaciones de proceso, entrada y salida de material, tanques de almacenamiento y elementos mecánicos, para posteriormente realizar las primeras pruebas de flujo de material en el sistema y continuar agregando los subprocesos y las líneas de transporte de material, para comprender mejor el significado de los diagramas de flujo del proceso en el **Anexo 2**, se muestra el significado de la simbología utilizada para la representación de cada elemento de la planta recuperadora.

Con el acomodo de los elementos y las conexiones del diagrama de flujo se agregaron los parámetros de funcionamiento del sistema y los datos puntales de cada proceso, tales como las cantidades de material que se estará agregando en cada punto del sistema y el tiempo de operación requerido para cada elemento (**Figura 27**), y posteriormente se realizó las pruebas de flujo de material entre el sistema y se continuó agregando los elementos faltantes y realizando las modificaciones necesarias para el funcionamiento del sistema.

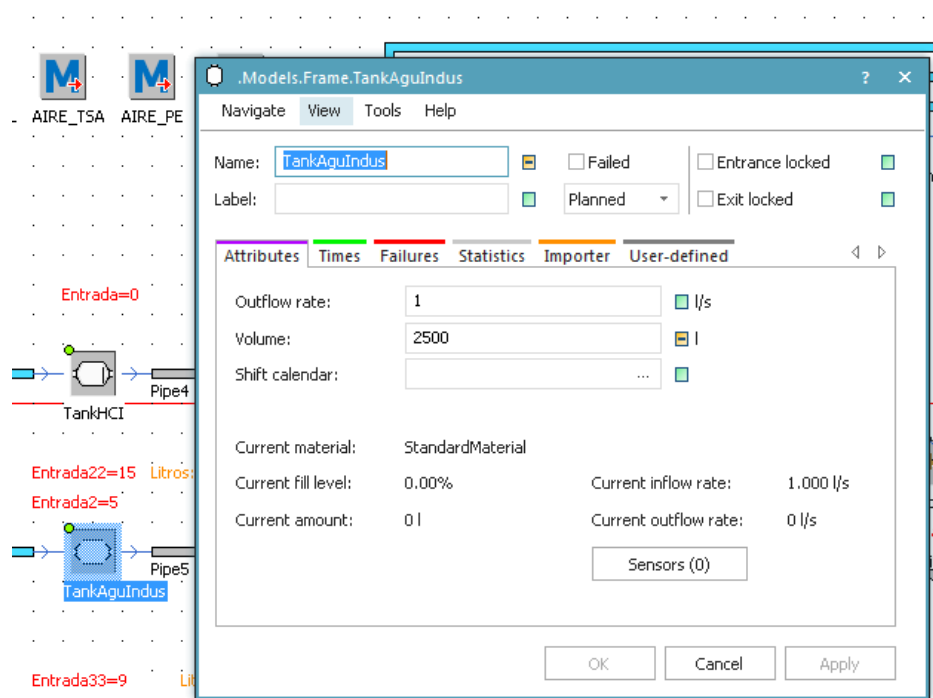


Figura 27.- Tabla de adquisición de datos para el funcionamiento de un elemento.

En el modelo de la **Figura 28, Anexo 3** se puede observar la primera simulación del flujo del sistema, donde en cada una de las estaciones se encuentra un indicador de cantidad de material que hay en cada estación así como también el flujo que tienen cada tubería, la cantidad de arena recuperada y la pérdida de materiales, como se observa en la **Figura 28 y 29**, este modelo cuenta con una gran cantidad de procesos, conexiones y subprocesos, lo cual hacen complicado el análisis del proceso y la modificación de parámetros de control, ya que cada uno de los cambios que se requieran realizar en el proceso tomaría demasiado tiempo, ya que como se muestra en la **Figura 27** se tiene que realizar proceso por proceso para realizar el ajuste o cambio de parámetros del modelo

para poder observar el comportamiento, por lo que no se cuenta con los suficientes parametros de control para relizar compensaciones conforme el proceso avanza en el tiempo, perdiendo los parametros de control y perdiendo la secuancia del ciclo ideal.

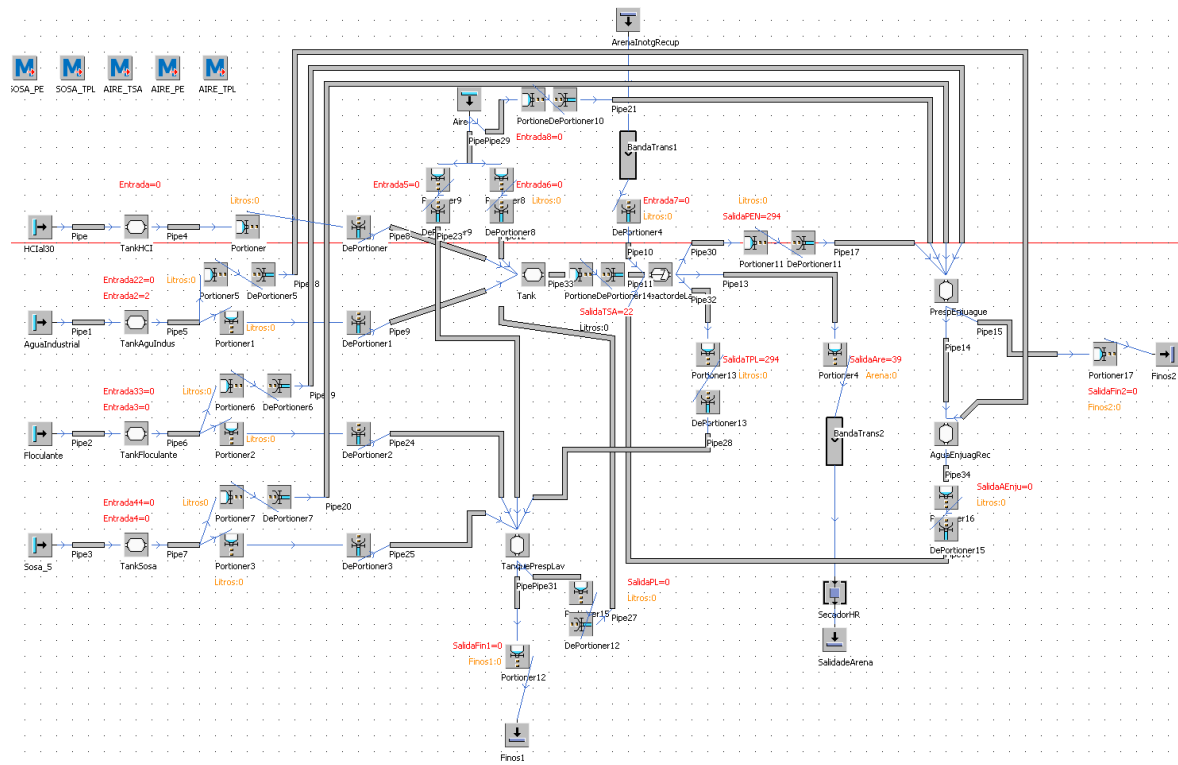


Figura 28.- Modelo de Simulación Piloto en 2D.

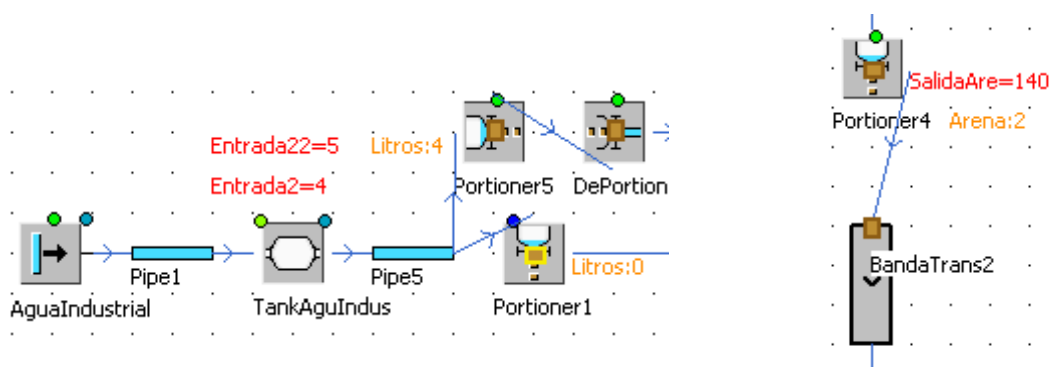


Figura 29.- *Vistas de procesos en modelo piloto.*

Continuando con la estructura basica de simulacion por eventos discretos, se realizo una simplificacion al primer modelo de simulacion, en la **Figura 30, Anexo 4** se puede observar la disminucion de procesos y conecciones que no son necesarios en el diseño del nuevo modelo, obteniendo un modelo con control de parametros y capaz de

más acercado a la realidad. En la **Figura 31** se observa el tipo de escritura que se utilizó para la programación del ciclo de recuperación, en donde se consideró cada elemento con sus parámetros, el tiempo que toma realizar cada proceso, el flujo que de material que tiene cada elemento respecto al otro y las operaciones que ayudan a realizar los ajustes en cada punto del sistema, por lo que ya no es necesario realizar la puesta de parámetros elemento por elemento, facilitando la representación de diferentes escenarios en menor tiempo (**ver Anexo 5**).

```

Ciclos:=1;
L:= tabla[2,8]*2
i:=1
Cargas:=1

- if Enj.value = true then
- while Cargas<=2000 loop
-   if TankSA.currentamount<=600 or AguaEnjuagRec.currentamount<=300 then

        p19.pipeOpened:= false;
        p20.pipeOpened:= false;
        p25.pipeOpened:= false;
        p24.pipeOpened:= false;
        p19.pipeOpened:= false;
        p20.pipeOpened:= false;
        p14.pipeOpened:= false;
        p15.pipeOpened:= false;
        p21.pipeOpened:= false;
        pe.pipeOpened:= false;
        ps.pipeOpened:= false;
        p30.pipeOpened:= false;
        p13.pipeOpened:= false;

```

Figura 31.- Programación del modelo de simulación.

4.2.5 CODIFICACIÓN DEL MODELO

El control de parámetros de operación se realizó mediante una tabla de adquisición de datos mostrada en la **Figura 32**, con la cual de forma sencilla se pueden realizar los cambios necesarios y modificar las condiciones de trabajo de la celda, estas modificación de parámetros se realizan mediante la unión de las tablas de datos y la programación ya que esta nos permite unir la comunicación máquina-ordenador, con la cual de manera sencilla se toman los parámetros marcados en la tabla adquisición de datos, se realizan las operaciones necesarias y se transmiten específicamente a cada proceso para realizar el ajuste, teniendo una respuesta en tiempo real y de manera sencilla, al analizar los parámetros nos damos cuenta que el ciclo permanece constante en la línea de tiempo manteniéndose uniforme y respetando los parámetros de operación.

Tiempos	
Lavado:	60 min
Enjuague1:	30 min
Enjuague2:	15 min
Secado:	15 min

Cantidad	
Agua Lavado:	600 L
Agua Enjuague1:	300 L
Agua Enjuague 2:	300 L
Agua Industrial:	650 L
Sosa:	1.5 L
Floculante:	1.5 L
Hd:	.360 L
Arena:	300 Kg

Perdidas	
Finos1:	50 L
Finos2:	50 L
Arena:	50 Kg

OK Cancel Apply

Figura 32.- Tabla de Adquisición de Datos.

4.2.6 VALIDACIÓN Y EXPERIMENTACIÓN DEL MODELO

Con el modelo de simulación simplificado y programado se continuo por realizar pruebas de validación al modelo para verificar si cumple con las especificaciones señaladas por el proceso, por lo que se comenzó por la puesta de parámetros de tiempo para verificar si la programación realiza la lectura de datos y realiza los ajustes en los procesos especificados por la tabla, en la siguiente **Figura 33** se muestra cómo es que este proceso de toma de datos ocurre desde la puesta de datos en la tabla y siguiente la programación toma el valor realiza su función y lo representa en el diagrama de flujo de la simulación.

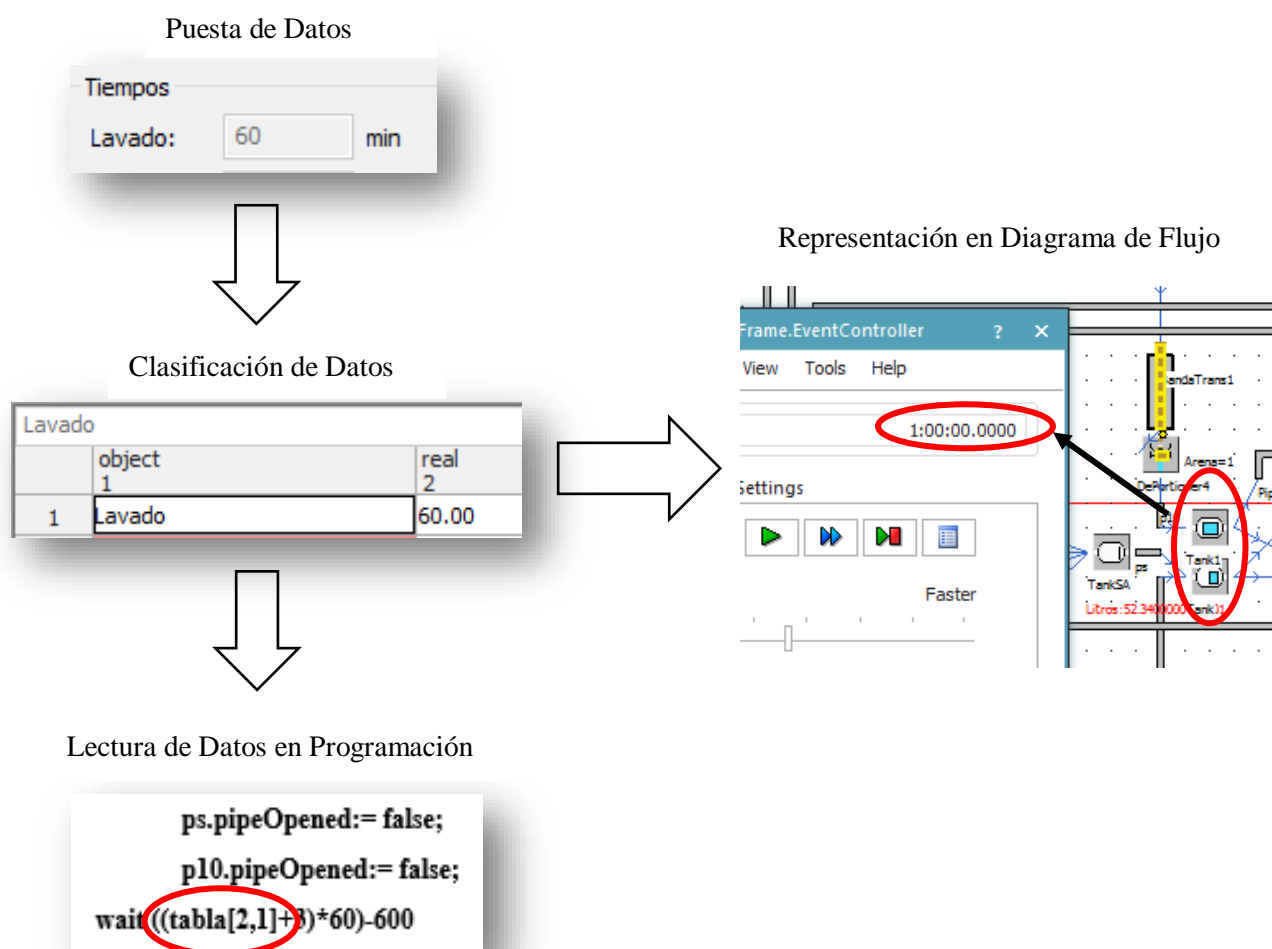


Figura 33.- Validación de datos de tiempo en la simulación.

En la **Figura 34** se muestra la validación de la cantidad de materiales que se van agregando en cada estación, desde que se fijan los datos en la tabla de adquisición y a continuación la programación realiza las operaciones necesarias, para agregar la cantidad necesaria al proceso según sea el caso que se quiera representar, por ejemplo se requiere agregar 1.5 litros de sosa y floculante por cada 100 litros de agua que tenga el tanque de precipitados de lavado por lo tanto si se tienen 600 litros de agua se agregarán 9 litros sosa y 9 litros de floculante los que da un total de 618 litros en total .

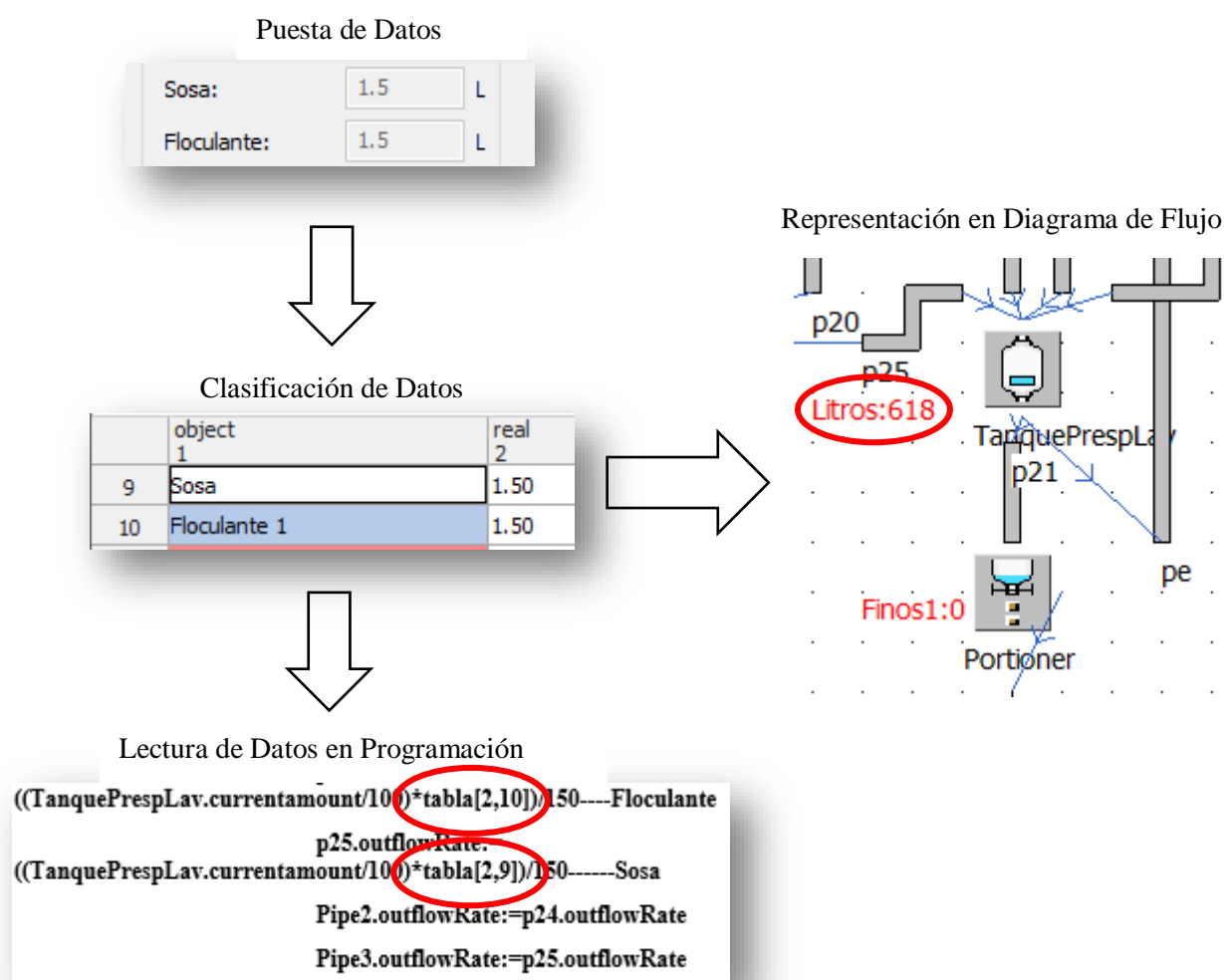


Figura 34.- Validación de datos de cantidad de materiales de aporte en la simulación.

Por otra parte también se consideraron salidas de material, ya que el sistema cuanta con pérdidas de líquido en las distintas estaciones ya que quedan sedimentos (lodos) después de cada ciclo de lavado-enjuague por lo tanto, estos se desechan para posteriormente reutilizar el líquido y aprovechar al máximo los materiales que se utilizan y no generar desechos excesivamente, en la siguiente **Figura 35** se puede observar cómo se consideran estas pérdidas y como se realiza el ajuste en la programación para activar las salidas de material dependiente la cantidad de líquido que tenga el tanque y el porcentaje de pérdida por ciclo.

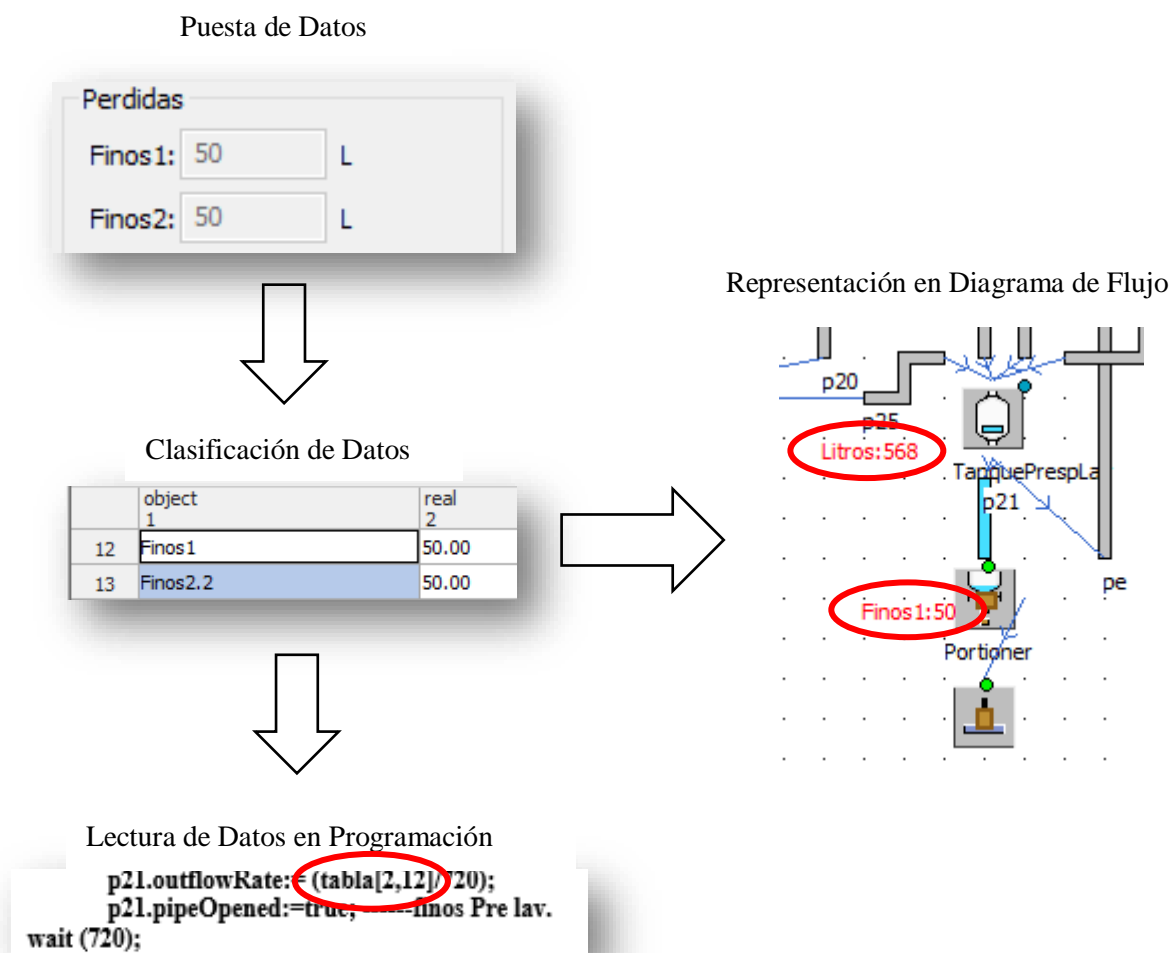


Figura 35.- Validación de pérdidas de material en la simulación.

Obtenida la información necesaria acerca de las dimensiones y funcionamiento de cada uno de los elementos se continuó por realizar la digitalización de cada elemento como se observa en la **Figura 38** para posteriormente realizar el ensamble.



Figura 38.- Digitalización de elementos.

Obtenidos los modelos en CAD de los elementos se analizó el área de trabajo disponible y el flujo de operaciones que se llevarán a cabo en el proceso de recuperación para realizar un primer acomodo de los elementos donde se obtenga el mejor desempeño energético colocando cada elemento estratégicamente dentro del área de trabajo, para esto se realizó el primer layout mostrado en la **Figura 39**.

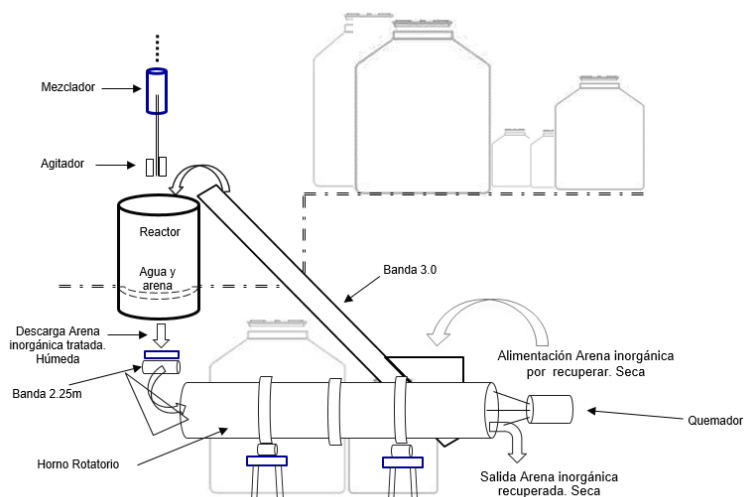
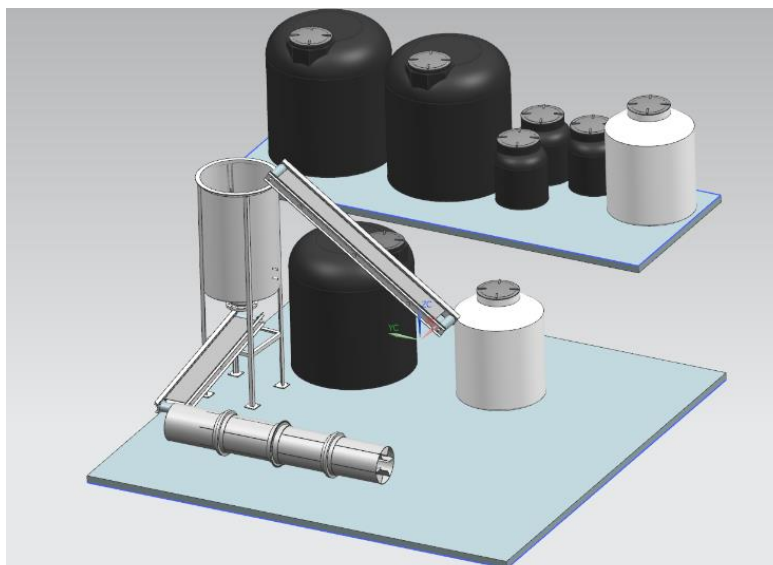


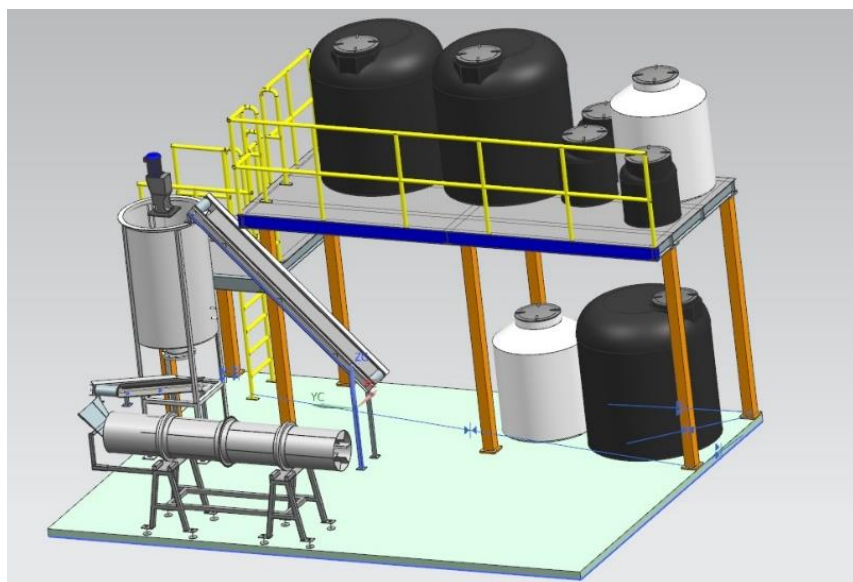
Figura 39.- Layout de Ensamble de Elementos.

En base al layout propuesto, se comenzó a realizar el ensamble de los elementos como se muestra en la **Figura 40**.



***Figura 40.-** Primer Ensamble de la planta Piloto.*

Se continuo realizando la digitalizacion de algunos de los elementos faltantes y se añadieron al ensamble, para obtener una visualizacion mas completa de como estara conformado el proceso de recuperacion en la siguiente **Figura 41**, se meustra una visualizacion previa del modelo en CAD.



***Figura 41.-** Ensamble de elementos de planta piloto.*

Ya teniendo una visualización más completa del modelo en CAD se continúa agregando elementos faltantes y realizando modificaciones en el acomodo de los elementos y modificación de algunos, esto para obtener un modelo de funcionamiento óptimo, en la **Figura 42** se observa algunos cambios realizados al entresuelo, también se agregó el diseño del soporte para el agitador de la mezcla en el reactor, estos cambios se fueron realizando con la finalidad de optimizar el proceso y obtener el mayor beneficio del área disponible de trabajo.

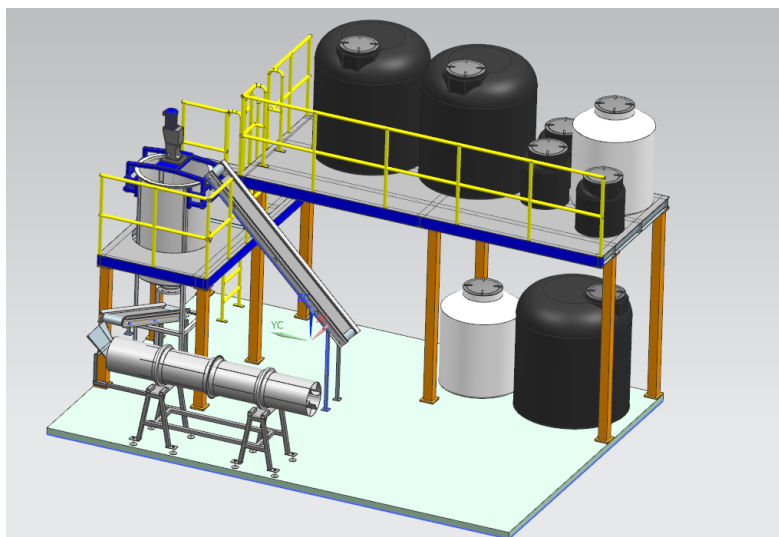


Figura 42.- Cambios en el ensamble de la planta piloto.

Se continuó realizando la modelación de la tubería, bombas y electroválvulas como se muestra en la **Figura 43**, y se realizaron cambios en el acomodo de los elementos con el fin de optimizar el mayor espacio posible, por otra parte, nuevamente se realizó la modificación del entresuelo para reducir el área que este ocupa.

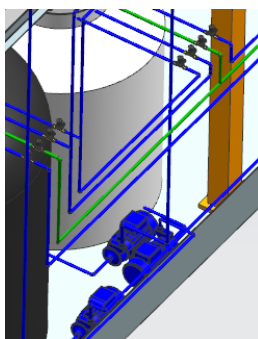


Figura 43.- Modelado de tuberías, electroválvulas y bombas de la planta piloto.

Se continuó realizando el diseño de algunos elementos faltantes como se muestra en la **Figura 44** ya que con estos elementos no se contaba y son necesarios para la planta piloto y posteriormente se agregaron al ensamble.

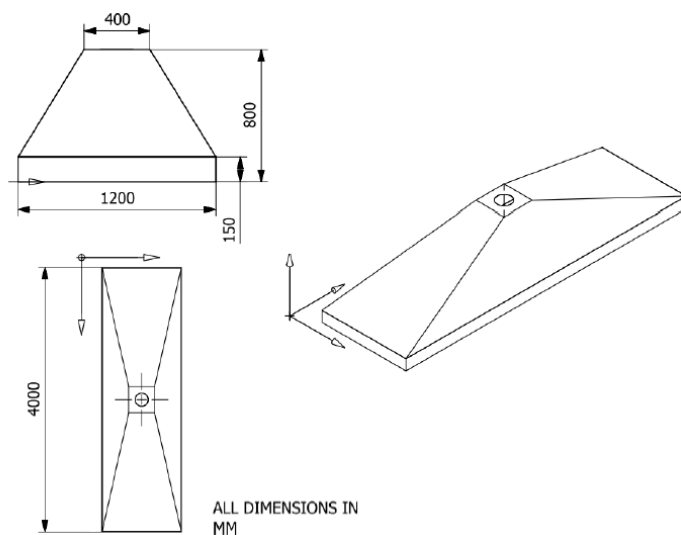


Figura 44.- Diseño de extractor de humo de planta piloto.

Se realizó el ensamble de los elementos como se muestra en la **Figura 45** en donde se observa el modelo 3D, en el cual se incorporan los elementos que dan forma a la planta piloto.

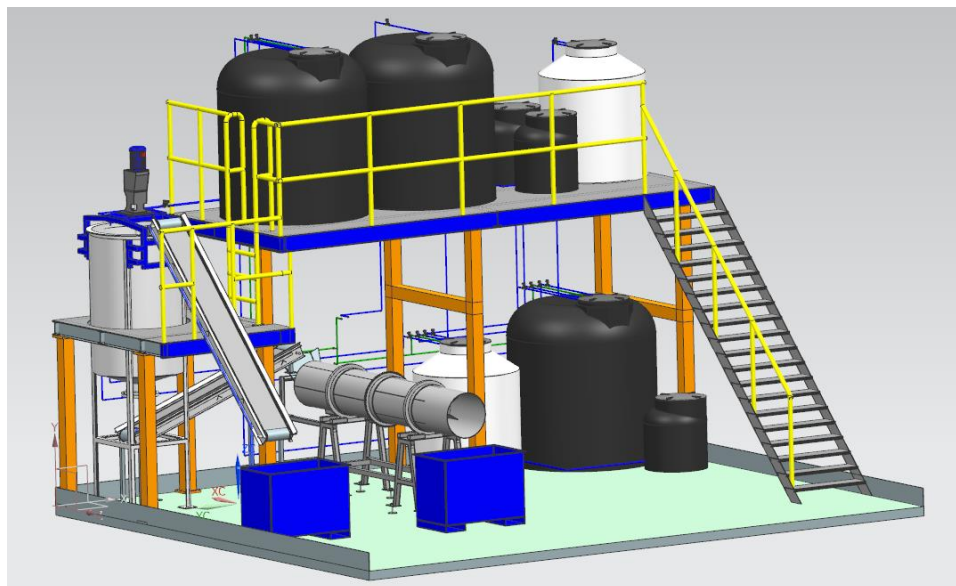


Figura 45.- Modelo 3D de planta recuperado de arena.

4.4 MODELO DE SIMULACIÓN 3D EN PLANT SIMULATION®

Con el modelo 3D realizado en el software Nx® de los elementos que forman la planta recuperadora de arena, se continuo con la simulación 3D del proceso, este se realizó en el software Plant Simulation®, en este modelo se visualizará, analizara y controlara el comportamiento de la línea de producción, por lo que se podrá realizar mejoras en el proceso de recuperación de arena y se obtendrá una simulación inteligente donde se pueda observar y mejorar el tiempo ciclo hasta llegar al funcionamiento óptimo y eficaz.

Para lograr una mejor visualizacion del funcionamiento y espacio que utilizara la planta se realizo la simulacion 3D del proceso, en la **Figura 46** se puede observar el proceso con los elementos que cuenta el software, por lo tanto, el resultado no es similar ah como este lucira en la realidad, dado que los elementos son representaciones basicas de funcionamiento de los elementos utilizados en este modelo.

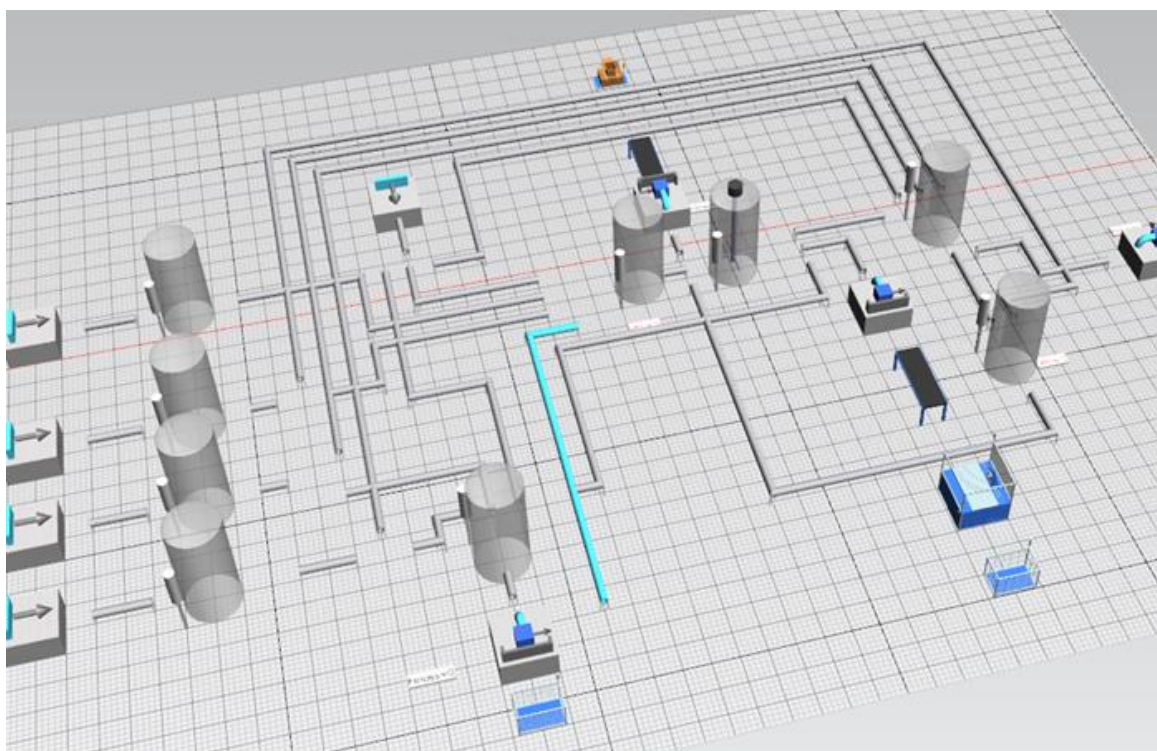


Figura 46.- Simulación básica del proceso de recuperación.

Para lograr una mejor visualización de espacio y apreciar el funcionamiento, se importaron cada uno de los elementos digitalizados y posteriormente se dio animación a los componentes móviles y se realizó el acomodo de cada uno de ellos para lograr el ensamble funcional de la misma. En la **Figura 47** se aprecia la simulación con los elementos de CAD importados a la simulación.

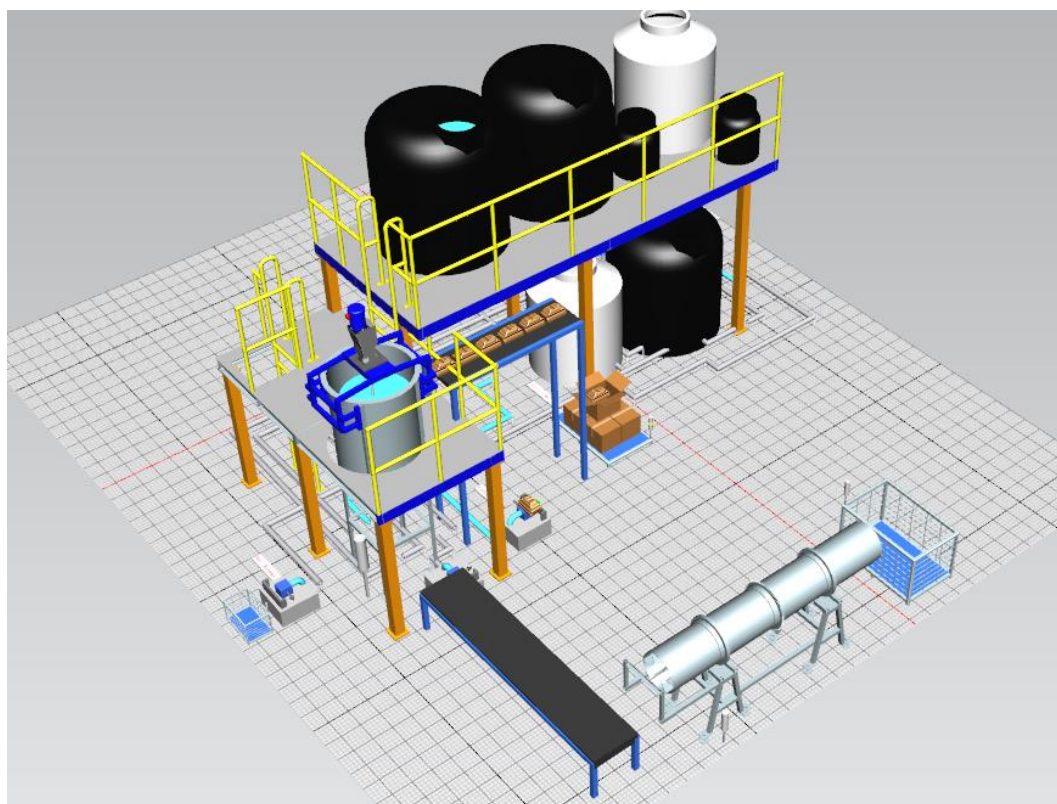


Figura 47.- Simulación 3D de proceso de recuperación de arena con modelos de CAD reales.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1 ANÁLISIS DEL MODELO DE RECUPERACIÓN OPTIMO EN PLANT SIMULATION®

El modelo de simulación final el cual se muestra en la **Figura 48** es el utilizado para representar el comportamiento de la planta piloto, ya que logra recrear los distintos escenarios que se puedan presentar ya que gracias a las tablas de adquisición de datos, la programación de la rutina de trabajo y la puesta de parámetros de operación, facilita la interacción con la interfaz a la hora de realizar simulaciones cambiando las variables de entrada, para representar producciones a gran escala o diversos escenarios de producción con lo cual se puede observar el comportamiento y los parámetros de operación del nuevo propuesto.

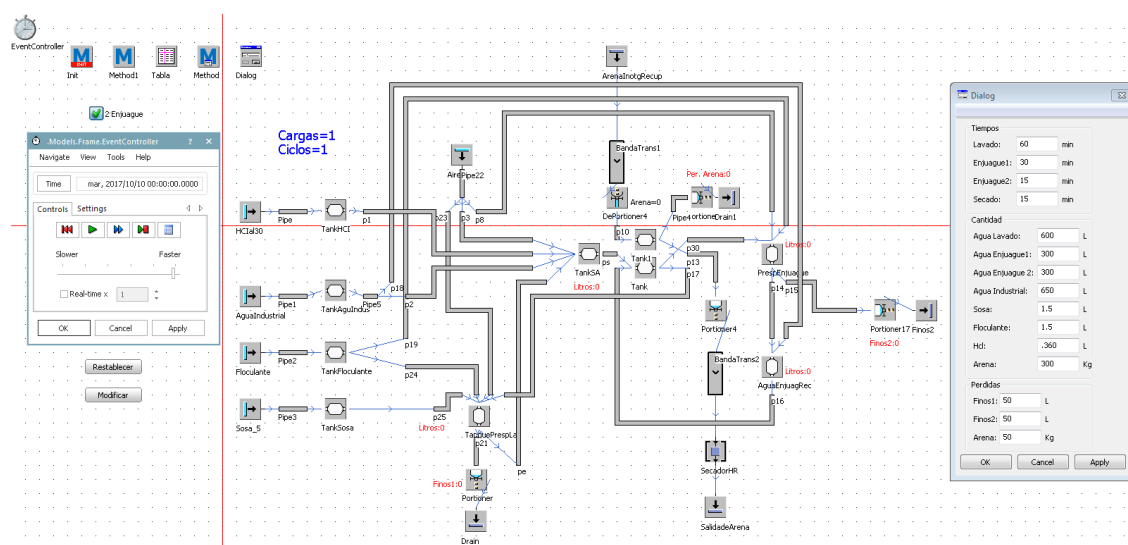


Figura 48.- Modelo de simulación de proceso de recuperación.

Para el modelo de simulación final se agregó una segunda rutina opcional en el ciclo, la cual solo cuenta con un ciclo de enjuague esto para realizar pruebas en el ciclo de lavado y poder optimizar el tiempo ciclo, en la **Figura 49** se observa que cuando se selecciona la casilla de enjuague la simulación realiza dos ciclos de enjuague y cuando no está seleccionada solo realizara un ciclo.

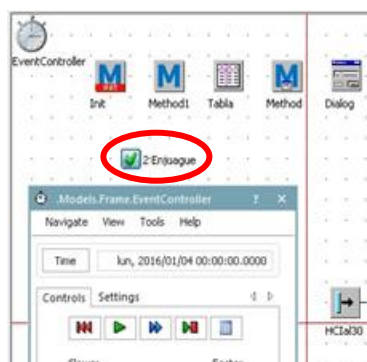


Figura 49.- Selector de número de enjuagues.

A partri de este modelo de simulación se puede realizar el analisis de distintos escenarios de producción, modificando paramentros de entrada mediante la tabla de adquisicion de datos la cual se muestra en la **Figura 50**, por lo tanto al modificar estos parametros de entrada se obtienenen los parametros de operación que requiere el esenario propueto.

 The image shows a 'Dialog' window with several sections of input fields. The 'Tiempo' section includes 'Lavado: 60 min', 'Enjuague1: 30 min', 'Enjuague2: 15 min', and 'Secado: 15 min'. The 'Cantidad' section includes 'Agua Lavado: 600 L', 'Agua Enjuague1: 300 L', 'Agua Enjuague 2: 300 L', 'Agua Industrial: 650 L', 'Sosa: 1.5 L', 'Floculante: 1.5 L', 'Hcl: .360 L', and 'Arena: 300 Kg'. The 'Perdidas' section includes 'Finos1: 50 L', 'Finos2: 50 L', and 'Arena: 50 Kg'. At the bottom are 'OK', 'Cancel', and 'Apply' buttons.

Figura 50.- Tabla de adquisición de datos de entrada.

Cabe mencionar que cada elemento dentro del diagrama de flujo del modelo de simulación puede ser modificado, por ejemplo, en la **Figura 51** se puede observar como cada elemento cuenta con una ventana emergente, en la cual se encuentran parámetros de funcionamiento específico del elemento que este seleccionado, por lo tanto, estos también se pueden utilizar para realizar cambios en el funcionamiento del modelo.

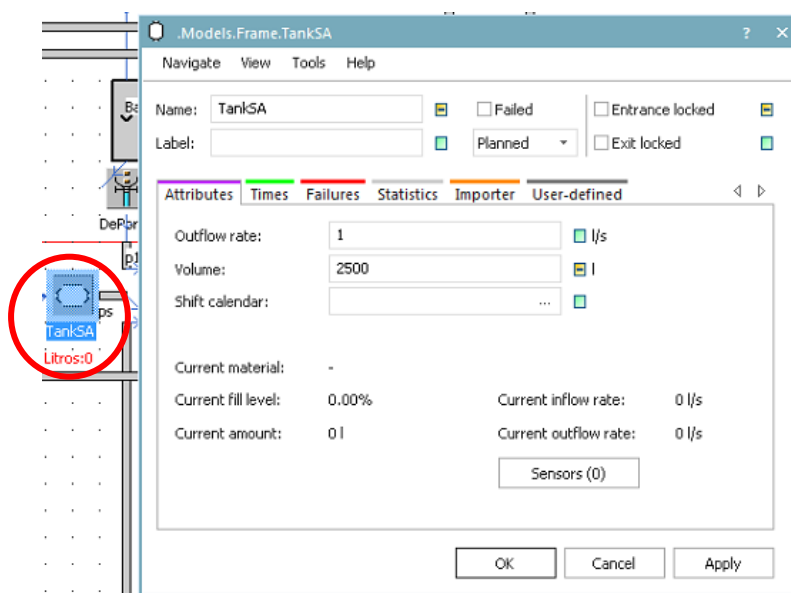


Figura 51.- Modificación de parámetros de funcionamiento.

Por otra parte el modelo cuenta con una serie de indicadores mostrados en la **Figura 52**, los cuales se utilizan para observar en tiempo real la cantidad de material que se encuentra en cada elemento, así como también los ciclos que han transcurrido apartir de que se comienza la simulación y el número de cargas de materiales de aporte que se utilizan para el ciclo de lavado.



Figura 52.- Indicadores de cantidad, cargas y ciclos.

5.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS DEL MODELO DE RECUPERACIÓN OPTIMO EN PLANT SIMULATION®

Tomando en consideración los parámetros de operación propuestos en el proceso NERIS para el funcionamiento del sistema se realizó la corrida del modelo de simulación mostrado en la **Figura 53**, en el cual no se consideraron perdidas de arena y materiales de aporte, esto para obtener los parámetros principales de operación y funcionamiento del sistema.

A partir de este modelo de simulación, se puede realizar la comparativa de resultados entre modelos, donde se propongan y representen diversos escenarios de simulación y por lo tanto se obtengan resultados, en base a las pérdidas de materiales y arena. Con las pérdidas de materiales y arena que se propongan en cada ciclo, se puede obtener la cantidad de materiales de aporte que se estará recuperando en cada ciclo, así como también el tiempo que tomara realizar estas operaciones de recuperación y el tiempo ciclo del sistema. Para este modelo de simulación se tomaron los datos mostrados en la **Figura 54**, en la cual no se consideró ningún tipo de pérdida por lo que los valores de la parte inferior de la tabla permanecen en cero.

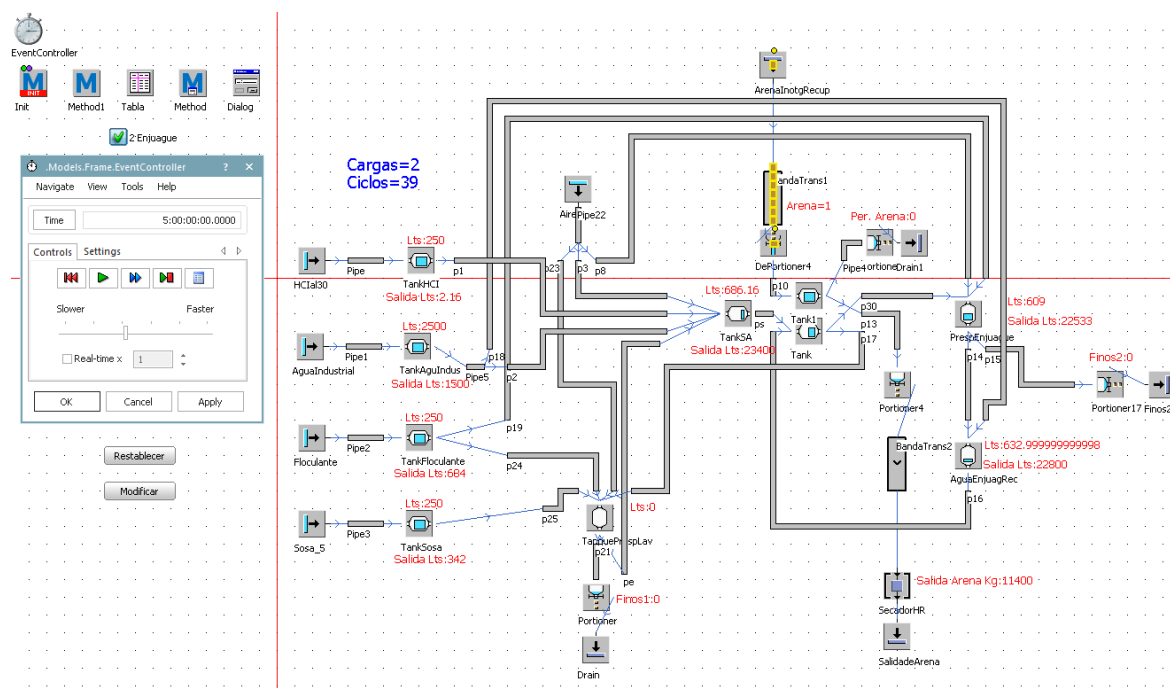


Figura 53.- Modelo de simulación sin considerar perdidas de material.

Dialog

Tiempos

Lavado: 60 min

Enjuague1: 30 min

Enjuague2: 15 min

Secado: 20 min

Cantidad

Agua Lavado: 600 L

Agua Enjuague1: 300 L

Agua Enjuague 2: 300 L

Agua Industrial: 600 L

Sosa: 1.5 L

Floculante: 1.5 L

Hcl: .360 L

Arena: 300 Kg

Perdidas

Finos1: 0 L

Finos2: 0 L

Arena: 0 Kg

OK Cancel Apply

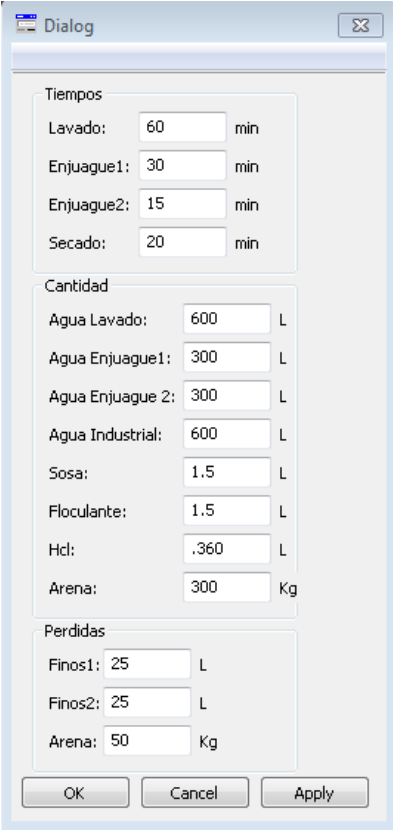
Figura 54.- Datos de operación del modelo principal sin considerar perdidas.

Por lo tanto, se obtuvieron los datos mostrados en la **Tabla 10**, donde se define la cantidad de materiales utilizados y la cantidad de arena recuperada cada ocho horas durante un tiempo de cinco días.

Tabla 10.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena sin considerar perdidas.

Materiales utilizados en el proceso de recuperación sin considerar perdidas por finos						
Días	Horas	Materiales				
		HCl al 30% Lts.	Agua Industrial Lts.	Floculante al .1% Lts.	Sosa al 5% Lts.	Arena Kg
1	0:00-8:00	2.16	1500	45	27	600
	8:00-16:00	2.16	1500	90	45	1500
	16:00-24:00	2.16	1500	135	72	2100
2	0:00-8:00	2.16	1500	180	90	3000
	8:00-16:00	2.16	1500	225	117	3600
	16:00-24:00	2.16	1500	270	135	4500
3	0:00-8:00	2.16	1500	315	162	5100
	8:00-16:00	2.16	1500	360	180	6000
	16:00-24:00	2.16	1500	405	207	6600
4	0:00-8:00	2.16	1500	450	225	7500
	8:00-16:00	2.16	1500	504	252	8340
	16:00-24:00	2.16	1500	549	279	9000
5	0:00-8:00	2.16	1500	594	297	9900
	8:00-16:00	2.16	1500	639	324	10500
	16:00-24:00	2.16	1500	684	342	11400
Total:		2.16	1500	684	342	11400

Para este modelo de simulación se consideró una pérdida de arena de 50 kg por ciclo y una pérdida de finos de 25 litros en cada tanque de precipitados del sistema, por lo que los parámetros de operación se establecieron como se muestra en la **Figura 56**. Se consideró este parámetro de pérdida de uno a dos, ya que las dos pérdidas por finos están ligadas directamente con la cantidad de arena que se quiera recuperar y la pedida que se tiene de esta.



Tiempos		
Lavado:	60	min
Enjuague1:	30	min
Enjuague2:	15	min
Secado:	20	min

Cantidad		
Agua Lavado:	600	L
Agua Enjuague1:	300	L
Agua Enjuague 2:	300	L
Agua Industrial:	600	L
Sosa:	1.5	L
Floculante:	1.5	L
Hcl:	.360	L
Arena:	300	Kg

Perdidas		
Finos1:	25	L
Finos2:	25	L
Arena:	50	Kg

Buttons: OK, Cancel, Apply

Figura 56.- Datos de operación del modelo principal considerando pérdidas.

Con las pedidas consideradas para este modelo de simulación se obtuvieron los datos mostrados en la **Tablas 12**, en donde se puede observar que ocurre un incremento en el consumo de HCI y agua industrial, esto ocurre por las pérdidas de material que tiene el sistema, por lo que se requiere de una mayor recuperación de estos dos materiales a la hora de realizar un ciclo nuevo, ya que algunos tanques no cumplen con la cantidad requerida para realizar un ciclo nuevo, por otra parte, disminuye la cantidad de floculante y sosa esto se debe también a la pérdida de material, ya que entre mayor es la pérdida, se requiere una menor cantidad de estos dos materiales para recuperar el

material sobrante ya que estos se añaden en proporción al material sobrante después de realizar el ciclo de recuperación y por último la perdida se ve reflejada principalmente en la cantidad de arena recuperada, la cual se muestra en la última columna de la tabla de datos.

Tabla 12.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena considerando perdidas.

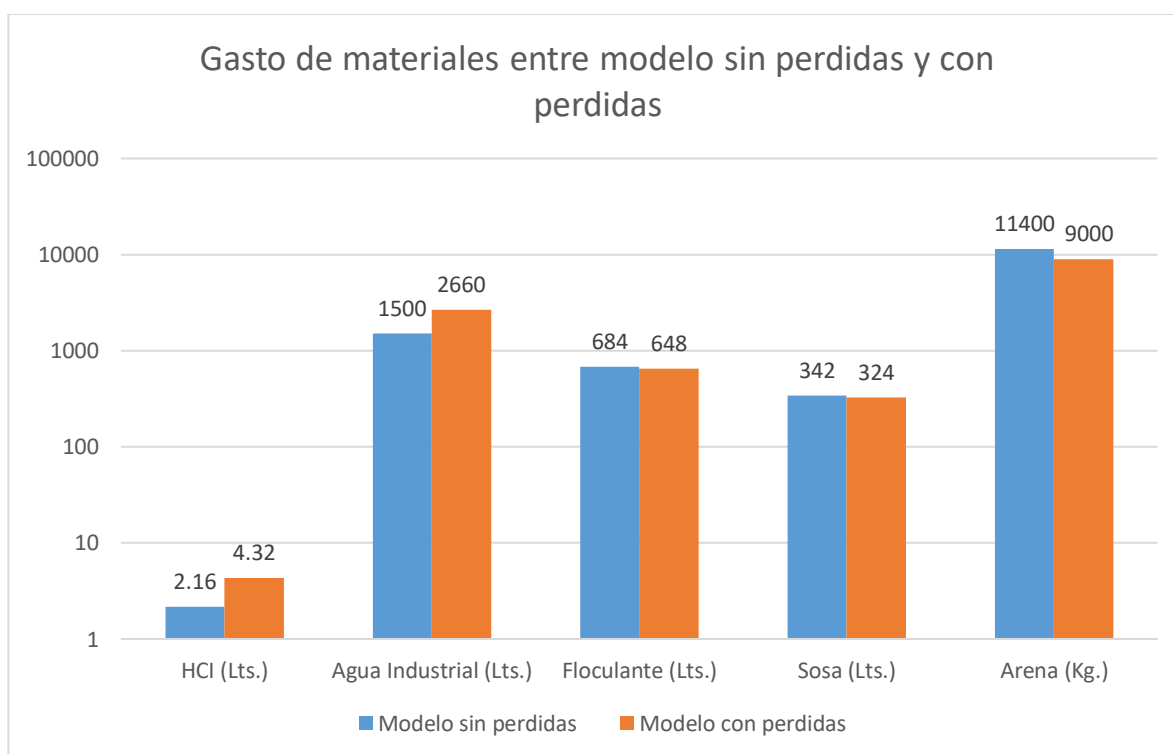
Materiales utilizados en el proceso de recuperación considerando perdidas por finos						
Días	Horas	Materiales				
		HCl al30% Lts.	Agua Industrial Lts.	Floculante al 0.1% Lts.	Sosa al 5% Lts.	Arena Kg
1	0:00-8:00	4.32	2116	36	18	500
	8:00-16:00	4.32	2148	81	45	1000
	16:00-24:00	4.32	2196	126	63	1750
2	0:00-8:00	4.32	2228	171	90	2250
	8:00-16:00	4.32	2276	216	108	3000
	16:00-24:00	4.32	2308	261	135	3500
3	0:00-8:00	4.32	2340	306	153	4174
	8:00-16:00	4.32	2388	342	171	4750
	16:00-24:00	4.32	2420	387	198	5250
4	0:00-8:00	4.32	2468	432	216	6000
	8:00-16:00	4.32	2500	477	243	6500
	16:00-24:00	4.32	2548	522	261	7250
5	0:00-8:00	4.32	2580	567	288	7750
	8:00-16:00	4.32	2612	612	306	8349
	16:00-24:00	4.32	2660	648	324	9000
Total:		4.32	2660	648	324	9000

Dado que la afectación por perdidas se ve reflejada directamente en la arena que se agrega en cada ciclo, también se tiene pérdidas directas en la cantidad de agua industrial que se utiliza en mayor cantidad que los demás materiales, por lo que en cada ciclo se requiere recuperar el nivel de esta en los tanques de solución acida y de agua de enjuague recuperada, por lo tanto, esto conlleva a un aumento en el tiempo ciclo del sistema y esto se ve reflejado en la cantidad de ciclos que se realizan por día, en la **Tabla 13**, se muestran los datos obtenidos sobre los ciclos que se realizan por cada ocho horas durante cinco días considerando perdidas, en los cuales podemos observar que existe una disminución de ciclos con respecto al modelo donde no se consideran perdidas, esto se debe a la recuperación de material que se requiere realizar para compensar las pérdidas que se tienen en los tanques.

Tabla 13.- Ciclos realizados cada ocho horas durante 5 días sin considerar perdidas.

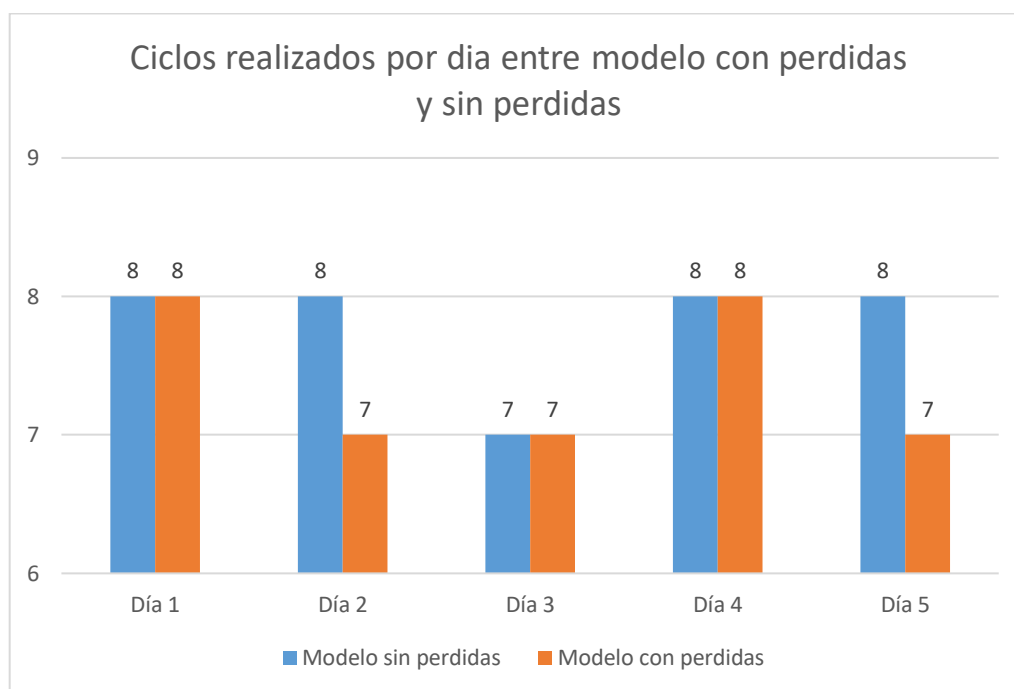
Ciclos realizados por día considerando perdidas			
Días	Horas	Ciclos	Total
1	0:00-8:00	3	8 Ciclos
	8:00-16:00	2	
	16:00-24:00	3	
2	0:00-8:00	2	7 Ciclos
	8:00-16:00	3	
	16:00-24:00	2	
3	0:00-8:00	2	7 Ciclos
	8:00-16:00	3	
	16:00-24:00	2	
4	0:00-8:00	3	8 Ciclos
	8:00-16:00	2	
	16:00-24:00	3	
5	0:00-8:00	2	7 Ciclos
	8:00-16:00	2	
	16:00-24:00	3	

En la **Gráfica 1** se puede observar la comparativa entre los datos obtenidos de ambos modelos, donde no se consideran perdidas de material y la variación que existe entre ellos cuando se consideran perdidas.



Gráfica 1.- Comparativa del consumo de materiales entre modelo sin perdidas y con pérdidas de material.

En la Grafica 2 se muestra la comparativa entre los ciclos realizados por día de los modelos sin considerar perdidas y considerando perdidas de material.



Gráfica 2.-Comparativa de ciclos realizados por día entre ambos modelos.

Cabe destacar que en el modelo de simulación sin considerar perdidas se genera una acumulación de material en el tanque de agua recuperada de enjuague, tal como se muestra en la **Figura 57**, ya que como no se tiene perdida de material este se va acumulando en cada ciclo, esto solo ocurre para el caso donde no se consideran perdidas de material por lo que es necesario realizar un vaciado del tanque para evitar que este llegue a la capacidad máxima y ocurra un derrame de material.



Figura 57.- Tanque de agua recuperada de enjuague.

5.3 ESCALAMIENTO Y OPTIMIZACIÓN PARA PRODUCCIÓN A MAYOR ESCALA DEL MODELO DE RECUPERACIÓN EN PLANT SIMULATION®

Para obtener una mayor producción se realizó el cambio de algunos parámetros de operación del sistema tal como se muestra en la **Figura 58**, en donde se modificó al doble la cantidad de arena que se quiere recuperar y con esto poder observar los requerimientos que necesita el sistema para realizar el proceso con estas condiciones y el comportamiento que este tendrá, por lo tanto también, se aumentó la cantidad de agua que entra al reactor de lavado, así como también la cantidad de agua que se utiliza para realizar el enjuague de la arena, ya que estas cantidades se agregan dependiendo la cantidad de arena que se quiere recuperar, los parámetros de tiempo permanecieron en el mismo orden que el modelo de simulación principal con el fin de conservar un tiempo de proceso similar y obtener una mayor producción.

Tiempos	
Lavado:	60 min
Enjuague1:	30 min
Enjuague2:	15 min
Secado:	20 min

Cantidad	
Agua Lavado:	1200 L
Agua Enjuague1:	600 L
Agua Enjuague 2:	600 L
Agua Industrial:	1200 L
Sosa:	1.5 L
Floculante:	1.5 L
Hcl:	.360 L
Arena:	600 Kg

Perdidas	
Finos1:	0 L
Finos2:	0 L
Arena:	0 Kg

Buttons: OK, Cancel, Apply

Figura 58.- Datos de operación del modelo a mayor escala sin considerar pérdidas.

Para esta simulación se realizó la primera corrida del modelo como se muestra en la **Figura 59**, en el cual no se consideraron pérdidas, con el fin de obtener un modelo base

y con este poder observar el comportamiento y los requerimientos primarios que este tendrá.

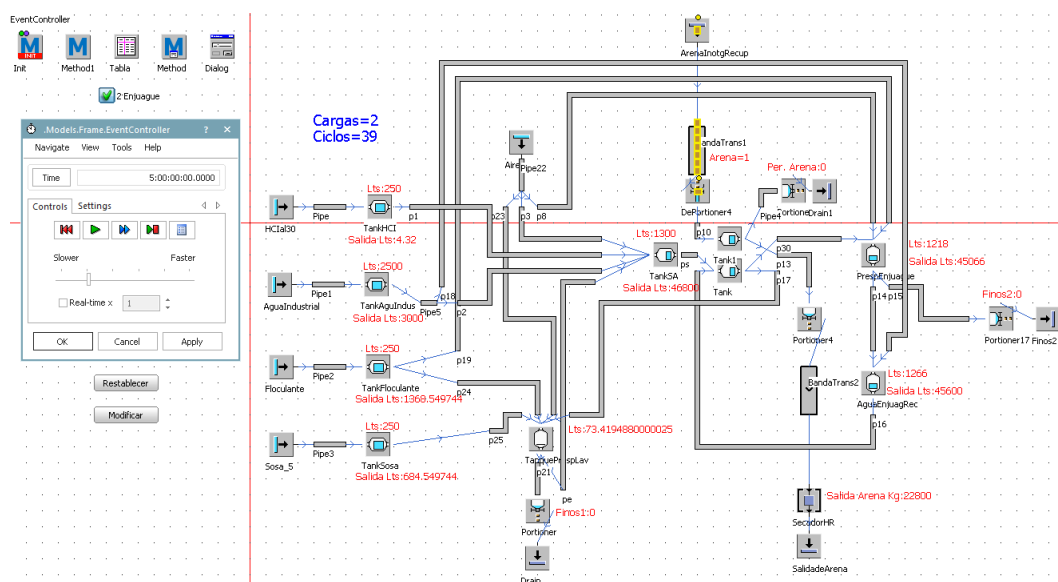


Figura 59.- Modelo de simulación a mayor escala sin considerar pérdidas de material.

Con las condiciones establecidas para este modelo se obtuvieron los datos mostrados en la **Tabla 14**, en la cual se observa que se realizó la toma de datos de manera similar al modelo principal, para realizar la comparativa de mejora en la recuperación de la arena.

Tabla 14.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena sin considerar pérdidas.

Materiales utilizados en el proceso de recuperación considerando pérdidas por finos						
Días	Horas	Materiales				
		HCl al 30% Lts.	Agua Industrial Lts.	Floculante al 0.1% Lts.	Sosa al 5% Lts.	Arena Kg
1	0:00-8:00	4.32	3000	90	54	1200
	8:00-16:00	4.32	3000	180	90	3000
	16:00-24:00	4.32	3000	270	144	4200
2	0:00-8:00	4.32	3000	360	180	6000
	8:00-16:00	4.32	3000	450	234	7200
	16:00-24:00	4.32	3000	540	270	9000
3	0:00-8:00	4.32	3000	630	324	10200
	8:00-16:00	4.32	3000	720	360	12000
	16:00-24:00	4.32	3000	810	414	13200
4	0:00-8:00	4.32	3000	900	450	15000
	8:00-16:00	4.32	3000	1008	504	16700
	16:00-24:00	4.32	3000	1098	558	18000
5	0:00-8:00	4.32	3000	1188	594	19800
	8:00-16:00	4.32	3000	1278	648	2100
	16:00-24:00	4.32	3000	1368	684	22800
Total:		4.32	3000	1368	684	22800

Por otra parte, también se realizó una corrida del modelo de simulación considerando perdidas de material tal como se muestra en la **Figura 60**, en donde podemos observar la variación en el consumo de materiales y la cantidad de arena recuperada.

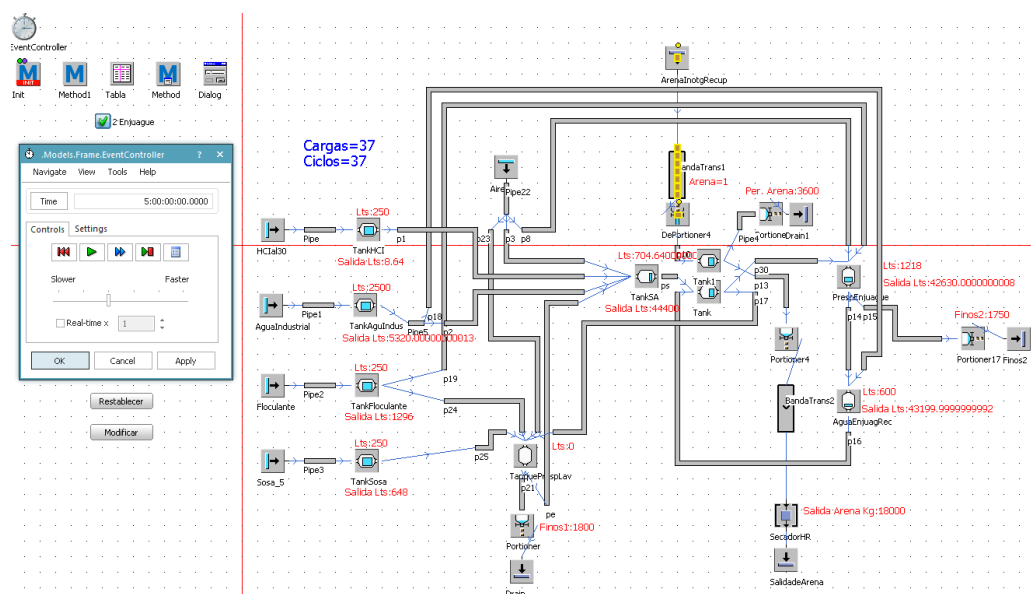


Figura 60.- Modelo de simulación a mayor escala sin considerar perdidas de material.

En este modelo se utilizaron los datos mostrados en la **Figura 61**, donde se realizó la puesta de los parámetros para las pérdidas que tendrá este sistema.

Figura 61.- Datos de operación del modelo a mayor escala considerando pérdidas.

Para las pérdidas en este modelo se consideró una pérdida por finos de 50kg en cada tanque de precipitados, por lo tanto, la pérdida de arena se consideró en 100kg por ciclo y la cantidad de materiales de aporte quedaron de manera similar al modelo anterior.

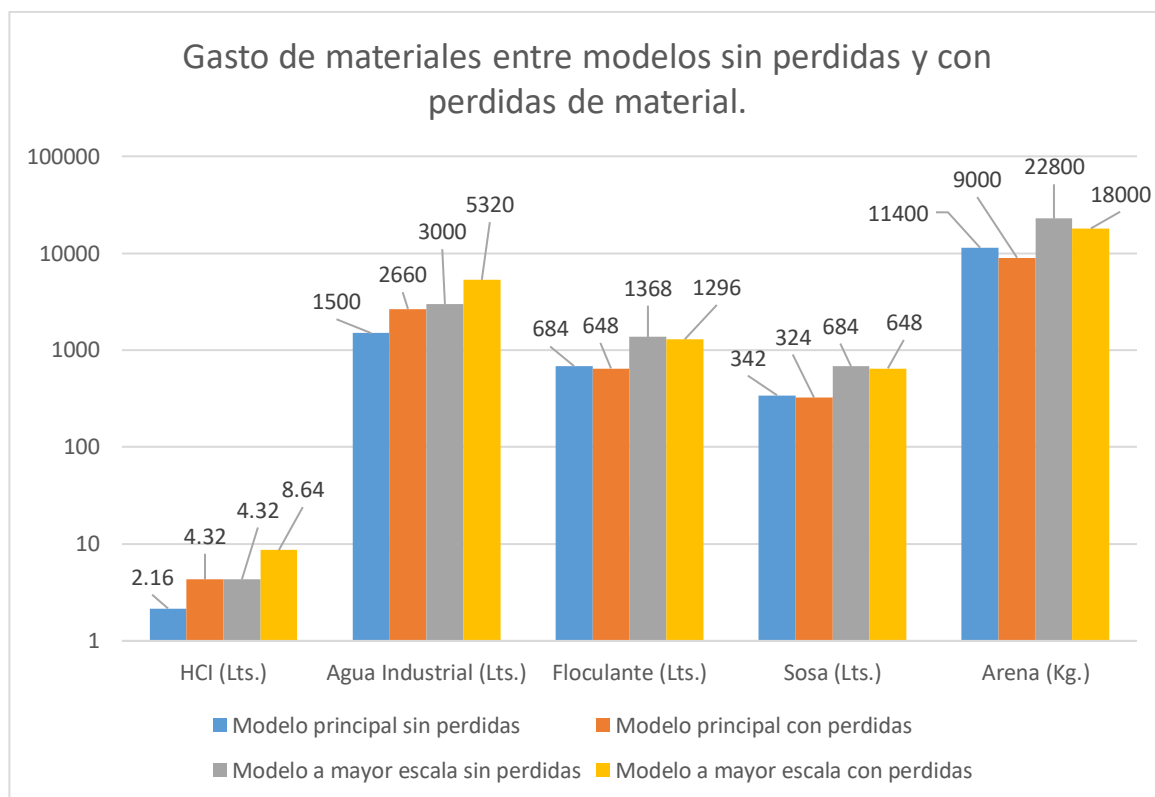
Con la puesta de parámetros y la consideración de pérdidas que tendrá el sistema se corrió el modelo de simulación y se obtuvieron los datos mostrados en la **Tabla 15**, donde podemos observar la disminución de arena recuperada debido a las pérdidas y el aumento en el consumo de agua industrial y HCl, esto por el incremento de arena que se tiene que recuperar, ocurriendo el mismo comportamiento que el modelo principal donde se consideraron pérdidas, por lo tanto también, el número de ciclos realizados por ambas simulaciones es igual que el modelo principal ya que no se modificaron parámetros de tiempos de operación por lo que no ocurre un incremento en el tiempo ciclo, debido a la compensación del sistema mediante la programación del modelo.

Tabla 15.- Materiales utilizados por día para la recuperación de arena sin considerar pérdidas.

Materiales utilizados en el proceso de recuperación considerando pérdidas por finos						
Días	Horas	Materiales				
		HCl al 30% Lts.	Agua Industrial Lts.	Floculante al 0.1% Lts.	Sosa al 5% Lts.	Arena Kg
1	0:00-8:00	8.64	4232	72	36	1000
	8:00-16:00	8.64	4296	162	90	2000
	16:00-24:00	8.64	4392	252	126	3500
2	0:00-8:00	8.64	4456	342	180	4500
	8:00-16:00	8.64	4552	432	216	6000
	16:00-24:00	8.64	4616	522	270	7000
3	0:00-8:00	8.64	4680	612	306	8400
	8:00-16:00	8.64	4776	684	342	9500
	16:00-24:00	8.64	4840	774	396	10500
4	0:00-8:00	8.64	4936	864	432	12000
	8:00-16:00	8.64	5000	954	486	13000
	16:00-24:00	8.64	5096	1044	522	14500
5	0:00-8:00	8.64	5160	1134	576	15500
	8:00-16:00	8.64	5224	1224	612	16709
	16:00-24:00	8.64	5320	1296	648	18000
Total:		8.64	5320	1296	648	18000

Con los datos obtenidos de ambas simulaciones del modelo principal y el modelo a mayor escala, se realizó la comparativa mostrada en la **Gráfica 3**, donde se muestra que el consumo de material se comporta de manera similar al modelo principal, ya que el consumo es proporcional a la cantidad de arena que se quiera recuperar por lo tanto en

esta simulación se incrementa al doble la cantidad que se utiliza de cada material, dado que inicialmente se duplico la cantidad de arena a recuperar, esto ocurre también con la arena recuperada ya que la cantidad de arena recuperada dependerá de las pérdidas que se tengan en el sistema.



Gráfica 3.-Comparativa de gasto de materiales entre el modelo principal y el modelo a mayor escala.

Por lo tanto, el sistema es capaz de representar producciones a mayor escala sin la necesidad de realizar cambios en la estructura del modelo, ya que el sistema es capaz de realizar los ajustes necesarios dependiendo la cantidad de arena que se quiera recuperar, esto gracias a la programación interna del modelo.

Por otra parte, se puede observar los puntos en el modelo de la **Figura 62**, donde los elementos bases del sistema no cumplen con la capacidad que el sistema requiere, por lo tanto, también se puede determinar la capacidad que cada elemento requerirá para representar los diversos escenarios de producción que se propongan, por lo tanto, para este escenario de producción se tendrán que remplazar, el reactor, el tanque de

precipitados de enjuague y el tanque de agua recuperada de enjuague ya que como se observa en la **Figura 62**, la cantidad de material que estos tienen es mayor a su capacidad ya que cada tanque inicialmente su capacidad es de 110lts.

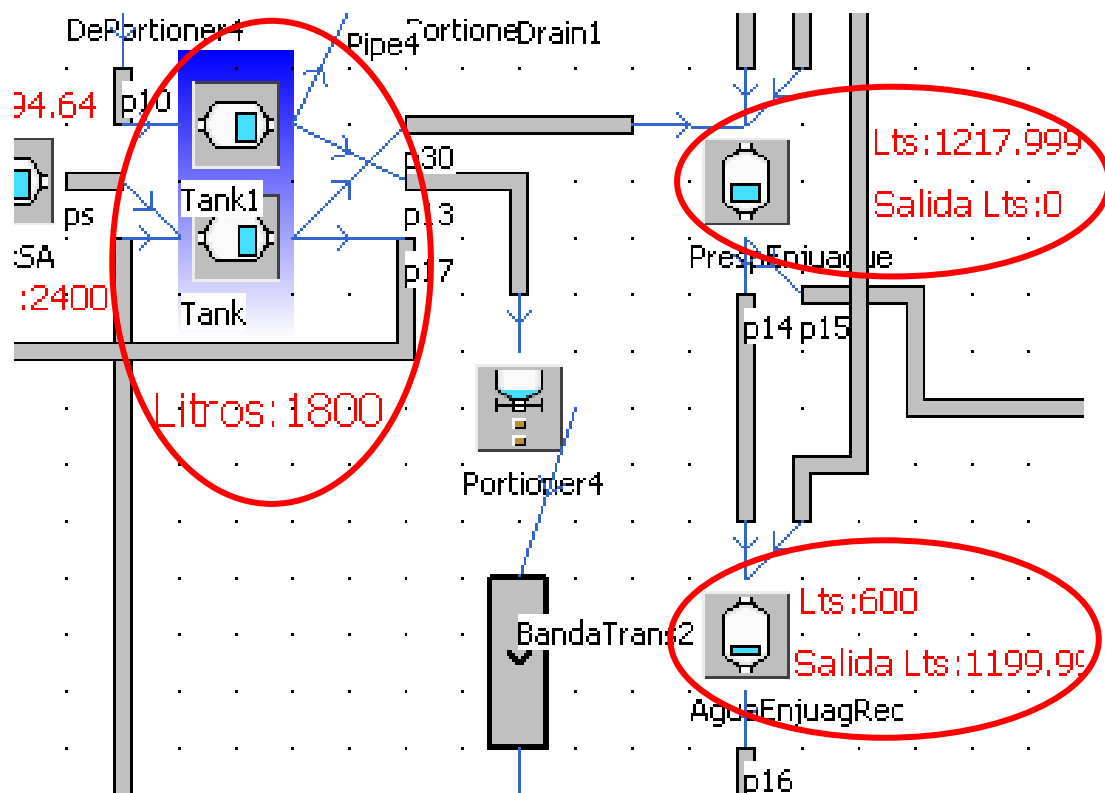


Figura 62.- Elementos del diagrama de flujo que no cumplen con el requerimiento del sistema para una mayor producción.

Por otra parte, a partir del modelo de simulación desarrollado se puede obtener el flujo que requiere cada línea del sistema para cumplir con el tiempo establecido por el proceso y o el escenario que se esté representando, en la Tabla 16, se muestra por ejemplo, las operaciones principales en las cuales se puede realizar directamente una mejora en el tiempo ciclo del proceso de recuperación, ya que estas operaciones son de movimientos de materiales y no repercuten sobre el proceso de recuperación por lo tanto tomando en cuenta el flujo requerido para trasladar el material de un tanque a otro se puede mejorar el flujo de estas tuberías dando como consecuencia la reducción de tiempo.

Tabla 16.- *Tiempos de movimiento de material y flujo requerido en tuberías.*

Flujos requeridos en las tuberías del sistema			
Operación	Movimiento	Flujo	Tiempo
Preparación de solución acida.	Tanque de agua Industrial---Tanque de solución acida ==1200lts	2 l/s.	10 min.
Llenado de reactor con solución acida.	Tanque de solución acida---Reactor==1200lts	1.33 l/s.	15 min.
Drenado de agua de lavado del reactor.	Reactor---Tanque de precipitados de lavado==1200lts	4 l/s.	5 min.
Llenado de reactor con agua para primer enjuague.	Tanque de agua recuperada de enjuague---Reactor==600lts	.83 l/s.	12 min.
Drenado de agua del primer enjuague del reactor.	Reactor---Tanque de precipitados de enjuague==600lts	2 l/s.	5 min.
Llenado de reactor con agua para segundo enjuague.	Tanque de agua recuperada de enjuague---Reactor==600lts	.83 l/s.	12 min.
Drenado de agua del segundo enjuague del reactor.	Reactor---Tanque de precipitados de enjuague==600lts	2 l/s.	5 min.

5.4 RESULTADO DE LA DIGITALIZACIÓN DE LA PLANTA RECUPERADORA DE ARENA EN NX®

Por ultimo con el digitalizado de todos los elementos que se utilizaran en el proceso de recuperación y las modificaciones realizadas al entresuelo propuesto, así como también al acomodo de los equipos, se obtuvo el ensamble final mostrado en la **Figura 53** en donde cada elemento se situó en el lugar adecuado para realizar el ciclo de recuperación de arena.

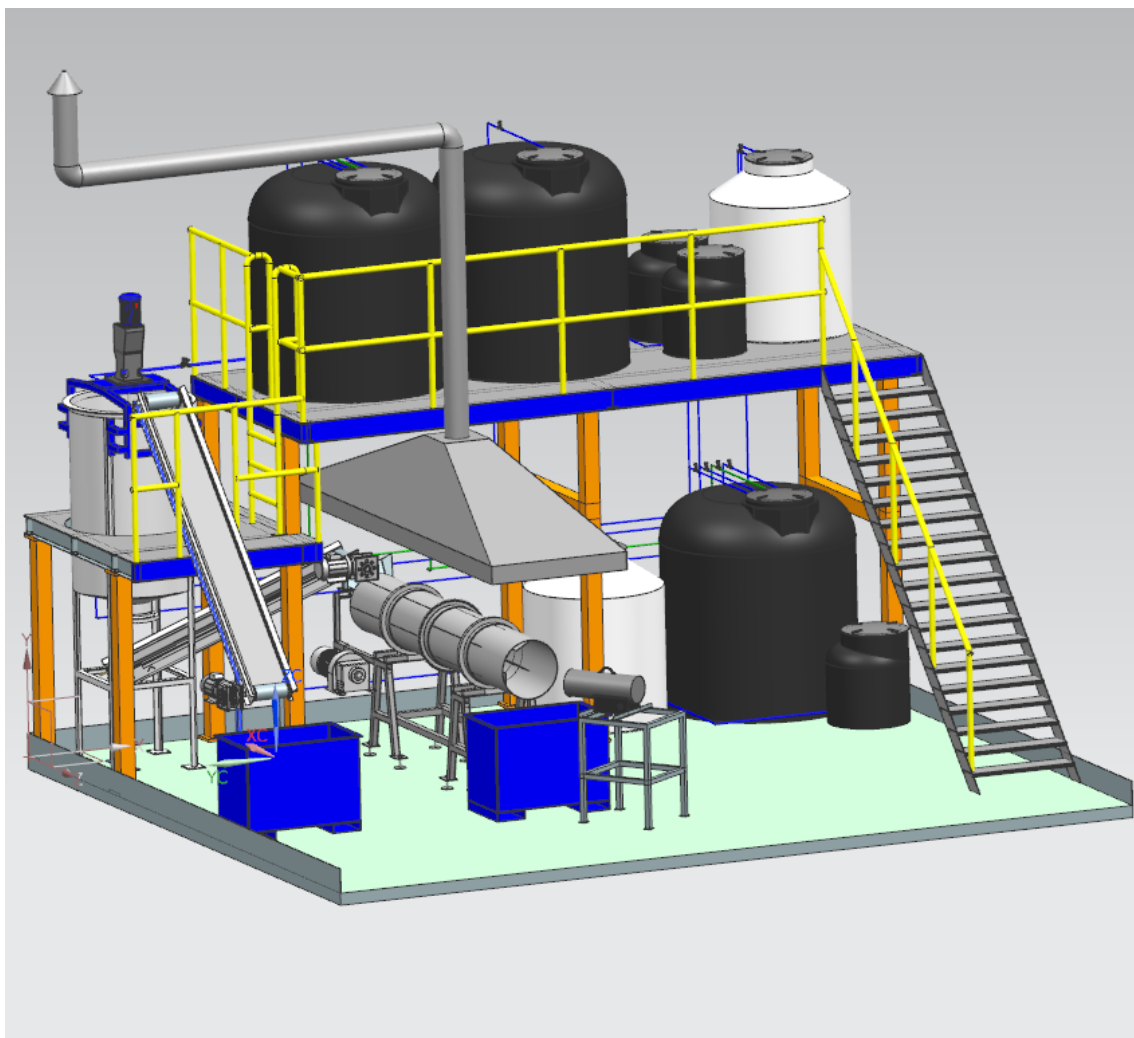


Figura 63.- Ensamble final de la planta recuperadora de arena.

5.5 RESULTADO DEL MODELADO 3D DE LA PLANTA RECUPERADORA DE ARENA EN PLANT SIMULATION®

Teniendo los elementos digitalizados se añadieron al modelo de simulación 3D como se muestra en la Figura 54, y posteriormente se realizó el acomodo de cada equipo en la posición definida en el ensamble realizado en Nx®, para después realizar la configuración de los equipos móviles, dando como resultado un modelo 3D donde se pudo visualizar el funcionamiento de los equipos realizando el proceso de recuperación de arena.

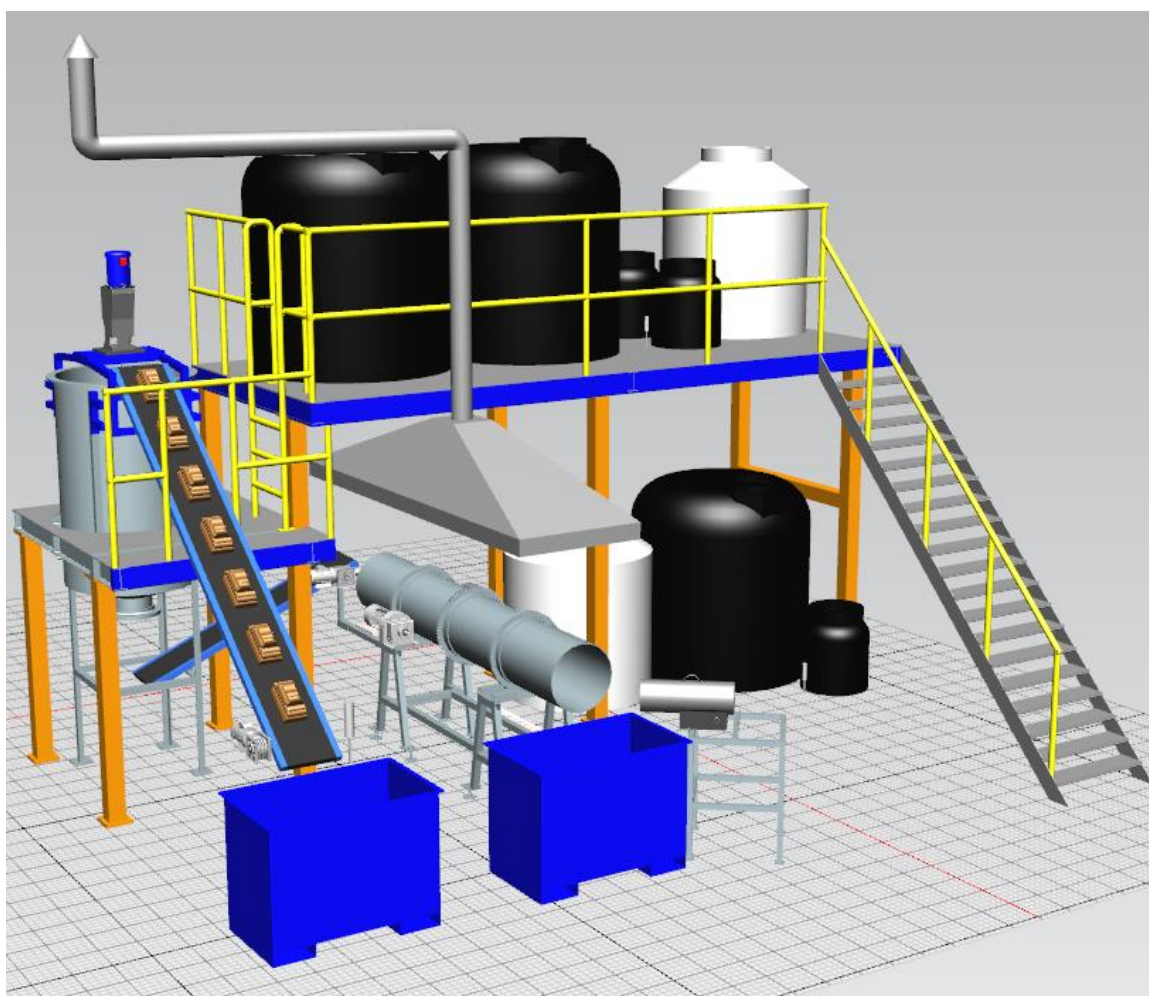


Figura 64.- Modelo final de la simulación 3D del proceso de recuperación.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

Mediante la simulación de procesos de manufactura se pueden obtener parámetros de operación esenciales para la implementación de nuevos procesos de producción sin el coste ni el riesgo de llevarlos a cabo, ya que la simulación permite obtener resultados de factibilidad de proceso en un menor tiempo.

Del sistema:

Se obtuvo el sistema optimo funcional con el cual se realizó la vinculación de los parámetros de entrada con el funcionamiento del proceso de recuperación de arena, a partir del mismo se logró obtener un primer modelo de simulación.

Del modelo de simulación optimo:

Con el modelo de simulación obtenido se puede visualizar el ciclo de recuperación de arena mediante un diagrama de flujo, así como en 3D con una vista real del sistema, también se puede realizar la visualización de los parámetros de operación del sistema, modificar los parámetros de entrada para realizar la simulación de diferentes escenarios de producción, ya que la interfaz que se obtuvo es bastante amigable y permite recrear la producción de recuperación de arena, mediante diversas condiciones.

Con el modelo de simulación la puesta de parámetros se realiza en un tiempo menor que con un modelo que haya sido programado elemento por elemento, gracias a que cuenta con un lenguaje de programación que facilita la entrada de datos al modelo.

Así mismo se puede visualizar en tiempo real y de manera puntual, en cada estación del proceso, que es lo que ocurre, tal como: llenado y vaciado de tanques, apertura de válvulas, cantidad de materiales existentes en cada tanque, el flujo de las tuberías, las pérdidas de materiales, cantidad de material nuevo añadido y de material desperdiciado, etc.

Modelo para escalamiento del proceso de producción:

Este modelo de simulación permite obtener los parámetros de producción a mayor escala, ya que puede determinar la capacidad que requiere cada uno de los elementos del sistema para cumplir con la demanda exigida. Asimismo, determina la cantidad de materiales de entrada, las pérdidas de materiales y el tiempo total del ciclo.

6.2 RECOMENDACIONES

Este trabajo se a vasado en obtener una metodología eficaz para realizar modelos de simulación de procesos de manufactura donde se obtengan tiempos y parámetros de operación esenciales para la implantación de nuevos procesos de producción, por lo que se recomienda para este trabajo continuar con el análisis de tuberías del sistema con el fin de obtener un análisis completo de flujo y comparar con el modelo simulado si el sistema será capaz de cumplir con los requerimientos y tiempos que propone el proceso de recuperación.

Realizar la comparativa del modelo de simulación con el modelo real una vez que esté en operación, para realizar un análisis y localización de puntos de mejora en el sistema y comprobar la factibilidad del modelo de simulación.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] B. Hüsamettin y S. Ramazan, «A comprehensive mathematical model for dynamic cellular manufacturing system design and Linear Programming embedded hybrid solution techniques,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 91, pp. 10-29, 2014.
- [2] J. Banks, J. S. Crason, B. L. Nelson y D. M. Nicol, *Discrete-event System Simulation*, 4ta ed., Pearson, 2011, p. 594.
- [3] T. . Yusuf y D. Berna, «A meta-model based simulation optimization using hybrid simulation-analytical modeling to increase the productivity in automotive industry,» *Mathematics and Computers in Simulation*, nº 120, pp. 120-128, 2016.
- [4] R.-D. Olivier y A. N. Per, «A Method and Application to Simulate and Validate Manufacturing Control Systems Based on a Discrete Manufacturing Simulation Plataform,» pp. 152-162, 2013.
- [5] C. A. Tapia , «Sistemas, modelos y simulacion,» 25 06 2003. [En línea]. Available: <http://materias.fi.uba.ar/7526/docs/teoria.pdf>. [Último acceso: 08 09 2016].
- [6] E. Del Castillo, *Process Optimization*, Pennsylvania USA: Springer, 2007.
- [7] C. E. Canales Nañez, «Efecto de aglutinantes organicos e inorganicos sobre arenas angulares para la fabricacion de corazones de fundicion,» Tesis de Licenciatura, FIME-UANL, Mexico, 2011.
- [8] I. Aguirre Rojo, «Uso de nanoparticulas de carbono en la fabricacion de corazones de arena para la fundicion de aluminio,» Tesis de Doctorado, FIME-UANL, México, 2013.
- [9] C. W. Ammen, *The complete handbook of sand casting*, United States of America: TAB BOOKS, 1979.
- [10] J. Rodríguez Hernández , «Desgaste erosivo en cajas de corazones usadas en la industria automotriz,» Tesis de Doctorado, FIME-UANL, México, 2014.
- [11] J. R. Gonzales Lopez, «Efecto de la temperatura sobre las propiedades fisicas de moldes y corazones producidos por el proceso fenol-uretano en caja fria,» Tesis de Maestria, FIME-UANL, México, 2001.
- [12] R. Oropeza Cortes , E. A. Sánchez Puerto y R. Aviles Reyes , «La erena residual de fundicion y su revalorizacion para la industria de construccion.,» Informe Técnico, Hidalgo, 2012.

- [13] S. P. Ward y R. Simpson, «Regeneración de arena». España Patente 2161448, 01 12 2001.
- [14] M. B. Acha Ruiz y T. Libano Zumalacarregui, «Procedimiento de recuperación de arena de fundición». España Patente ES2051211, 01 06 1994.
- [15] J. M. Svoboda, «Foundry Sand Reclamation,» Pittsburgh, 1990.
- [16] S. Weyer, M. Schmitt, M. Ohmer y D. Gorecky, Towards Industry 4.0 - Standarization as the crucial challenge for highly modular, multi-vendor production system, Kaiserslautern, Germany: IFAC-Papers OnLine, 2015.
- [17] A. Gilchrist, Industry 4.0: The Industrial Internet Of Things, Bangken, Nonthaburl thailand: Apress, 2016.
- [18] F. Rennung, C. Tudor Luminosu y A. Draghici, «Service Provision in the Framework of Industry 4.0,» nº 221, pp. 372-377, 2016.
- [19] H. Foidl y M. Felderer, «Research Challenges of Industry 4.0 for Quality Management,» nº 245, pp. 121-137, 2016.
- [20] R. Schmidt, M. Möhring, R.-C. Härting, C. Reichstein, P. Neumaier y P. Jazinovic, «Industry 4.0 - Potentials for Creating Smart Products: Empirical Research Results,» *Springer International Publishing Switzerland 2015*, vol. 1, nº 208, p. 12, 2015.
- [21] F. M. Martinez Garcia, «Murcia Industria 4.0,» 20 Enero 2016. [En línea]. Available: http://www.murciaindustria40.es/index.php?option=com_content&view=article&id=8:industria-4-0-la-fabrica-del-futuro&catid=8&Itemid=115.. [Último acceso: 05 Septiembre 2016].
- [22] S. Hachem, T. Teixeira y V. Issarny, «Ontologies for the Internet of Things,» *12th International Middleware Conference*, vol. 1, p. 7, 2011.
- [23] S. Haller, S. Karnouskos y C. Schroth, «The Internet of Things in an Enterprise Context,» *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, p. 15, 2009.
- [24] S. Jeschke, C. Brecher , H. Song y D. Rawat B., Industrial Internet of Things Cybermanufacturing Systems, USA: Springer International Publishing Switzerland, 2017.
- [25] S.-M. Chun y J.-T. Park, «A Mechanism for Reliable Mobility Management for Internet of Things Using CoAP,» *sensors*, vol. 1, nº 17, p. 13, 2017.
- [26] S. Huckle, R. Bhattacharya, M. White y N. Beloff, «Internet of Things, Blockchain and Shared Economy Applications,» *ELSEVIER*, vol. 1, nº 98, p. 6, 2016.
- [27] «Blac Solutions,» 2014. [En línea]. Available: <http://blacsol.com/iot-internet-of-things>. [Último acceso: 11 05 2017].
- [28] Q. Jing, A. V. Vasilakos, J. Wan, J. Lu y D. Qiu, «Security of the Internet of Things: perspectives

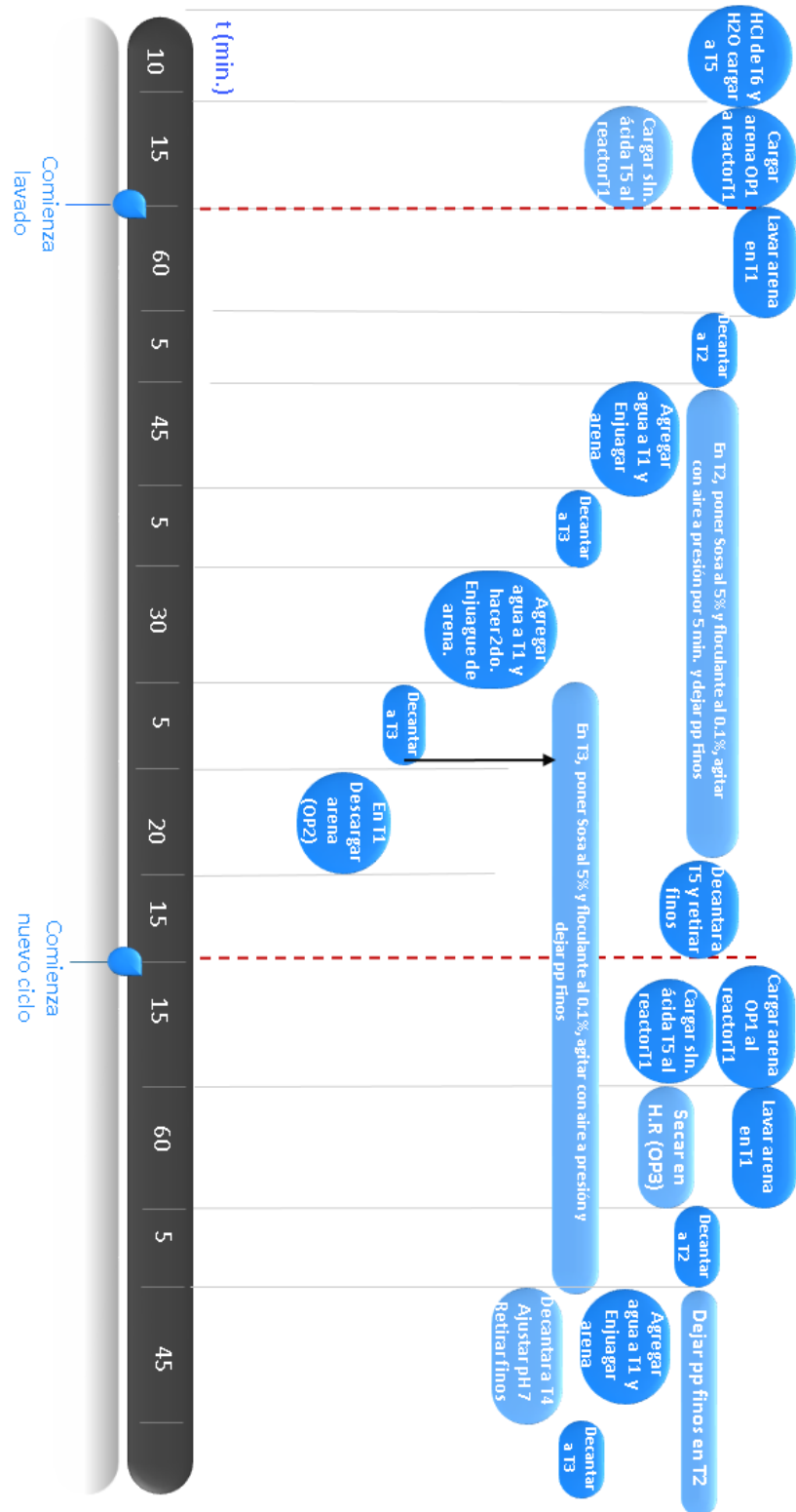
and challenges,» *Springer Science*, vol. 1, p. 22, 2014.

- [29] N. Shariatzadeh, T. Lundholm, L. Lindberg y G. Sivard, «Integration of digital factory based on Internet of Things,» *ELSEVIER*, vol. 1, nº 50, p. 6, 2016.
- [30] Z. G. dos Santos, L. Vieira y G. Balbinotti, «Lean Manufacturing and ergonomic working conditions in the automotive industry,» *Procedia Manufacturing*, nº 3, pp. 5947-5954, 2015.
- [31] A. Hosseini, H. A. Kishawy y H. M. Hussein, «Lean Manufacturing,» *Modern Manufacturing Engineering*, p. 21, 2015.
- [32] H. Theuer, N. Gronau y S. Lass, «The Umpact of Autonomy on Lean Manufacturing System,» *Advances in Suatainable and Competitive Manufacturing System*, nº 114, p. 11, 2013.
- [33] A. Vizán Idoipe y J. C. Hernández Matías, *Lean Manufacturing (Coceptos, Técnicas e Implantacion)*, Madrid: EIO, 2013.
- [34] Z. Zhou, S. (. Xie y D. Chen, *Fundamentals of Digital Manufacturing Science*, London: Springer-Verlag London Limited, 2012.
- [35] A. Caggiano y R. Teti, «Digital Manufacturing Cell Design for Performance Increase,» *ELSEVIER*, vol. 2, nº 1, p. 6, 2012.
- [36] L. Dulina y M. Bartanusova, «CAVE Design Using in Digital Factory,» *ELSEVIER*, vol. 1, nº 100, p. 8, 2014.
- [37] B. Bietzker, O. Karch y H. Noltemeier, «Using Randomized Algorithms for Digital Mock-Up in Automotive Industry,» *Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, vol. 1, p. 9, 2000.
- [38] U. Bracht y T. Masurat, «The Digital Factory between vision and reality,» *ELSEVIER*, vol. 1, nº 56, p. 9, 2005.
- [39] I. D. Stef, G. Draghici y A. Draghici, «Product design process model in the Digital Factory context,» *ELSEVIER*, vol. 1, nº 9, p. 12, 2013.
- [40] N. Shariatzadeh, T. Lundholm, L. Lindberg y G. Sivard, «Integration of digital factory with smart factory based on Internet of Things,» *ELSEVIER*, vol. 1, nº 50, p. 6, 2016.
- [41] J. Barceló, *Simulación de Sistemas Discretos*, 4th ed., Madrid: Isdefe, 2006, p. 247.
- [42] B. Varga, «Principles of Modeling and Simulation Processes,» *Electric and Plug-Hybrid Vehicles, Green Energy and Technology*, nº 1, p. 8, 2015.
- [43] J. Aracel, *Dinamica de Sistemas*, Madrid: Isdefe, 1995.
- [44] A. M. Law y W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, Second Edition ed., New York: McGraw-Hill, 1991.



















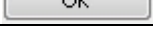
- [45] M. R. Azarang y E. García Dunna, Simulacion y analisis de Modelos estocásticos, Mexico: McGraw-HILL, 1998.
- [46] S. R. E., Simulacion de Sistemas. Diseño, desarrollo e implementacion, Mexico: Trillas, 1988.
- [47] A. M. Law y W. D. Kelton, Simulation Modeling and Analysis, Singapore: McGRAW-HILL International Editors, 1991.
- [48] J. Lenhard, G. Küppers y T. Shinn, «Simulation Pragmatic Construction of Reality,» *Published by Springer*, vol. XXV, nº 17, 2006.
- [49] G. S Fishman, Conceptos y metodos en la simulacion de eventos discretos, Mexico: Limusa, 1978.
- [50] S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers y B. L. Nelson, «Introduccion to modeling and simulation,» de *Winter Simulation Conference*, Binghamton, NY, 1997.
- [51] M. L. Lopez, Modeling and Simulation in the Systems Engineering li, Atlanta: Springer-Verlag London, 2015.
- [52] T. T. Allen, Introduction to Discrete Event Simulation and Agent-based Modeling, Columbus: Springer, 2011.
- [53] C. G. Cassandras y S. Lafortune, Introduccion to Discrete Event System, New York: Springer Science + Business Media, LLC , 2008.
- [54] J. Barceló, Simulacion de Sistemas Discretos, Madrid: Isdefe, 1996.
- [55] C. Byoung Kyu y K. Donghun, Modeling and Simulation of Discrete-Event Systems, Hoboken, New Jersey: Wiley, 2013.
- [56] S. P. L. M. Soft, Plant Simulation Basics, Methods, and Strategies, Siemens Product, 2015.
- [57] Deutsches Institut für Normung, «Simulation of systems in materials handling, logistics and production,» German, 2014.
- [58] S. Bangsow, Tecnomatix Plant Simulation, Munich: Springer, 2015.

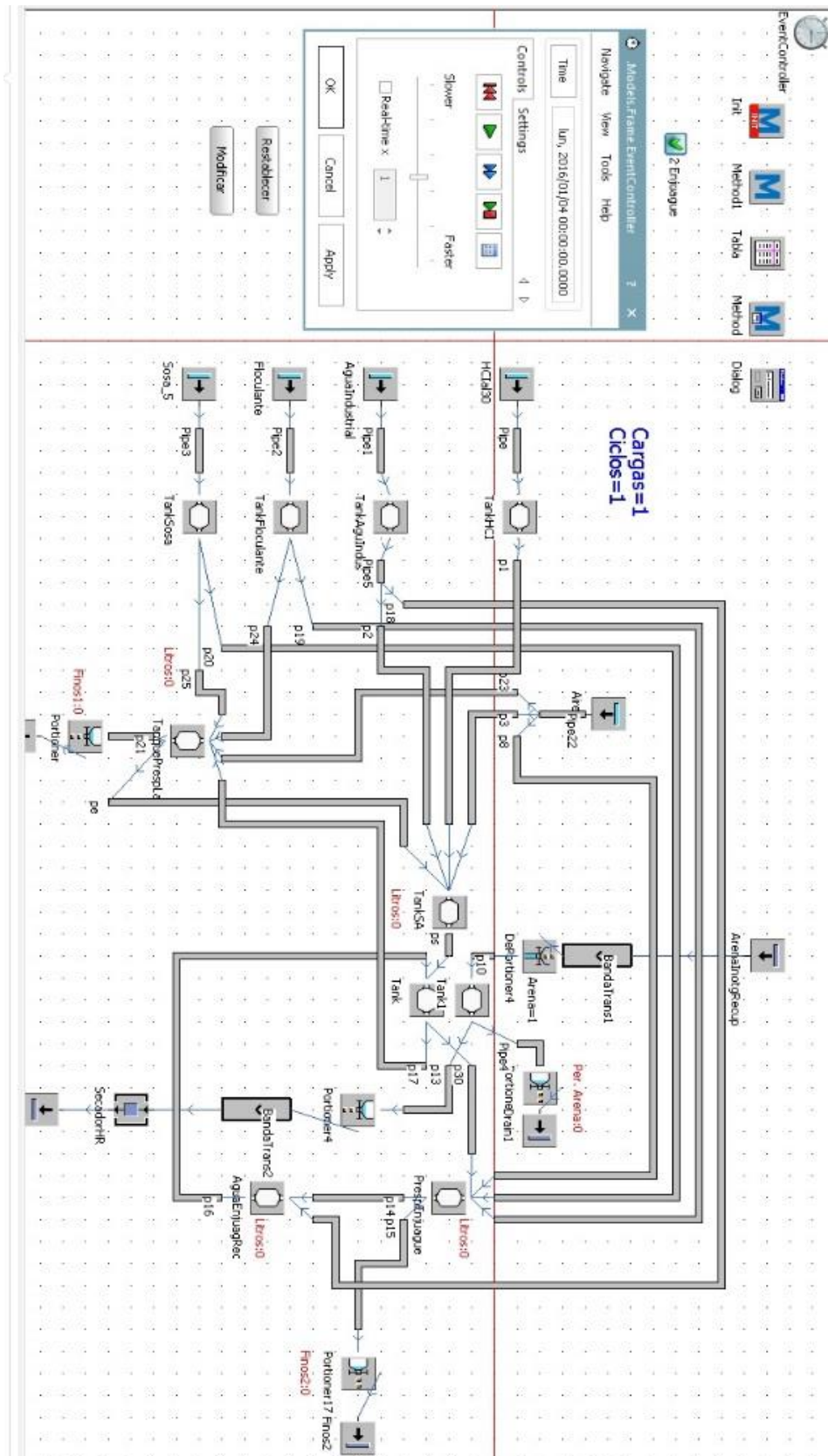
ANEXOS

Anexo1.- Descripción del proceso de recuperación de arena para fundición con tiempos de operación (proceso NERIS).

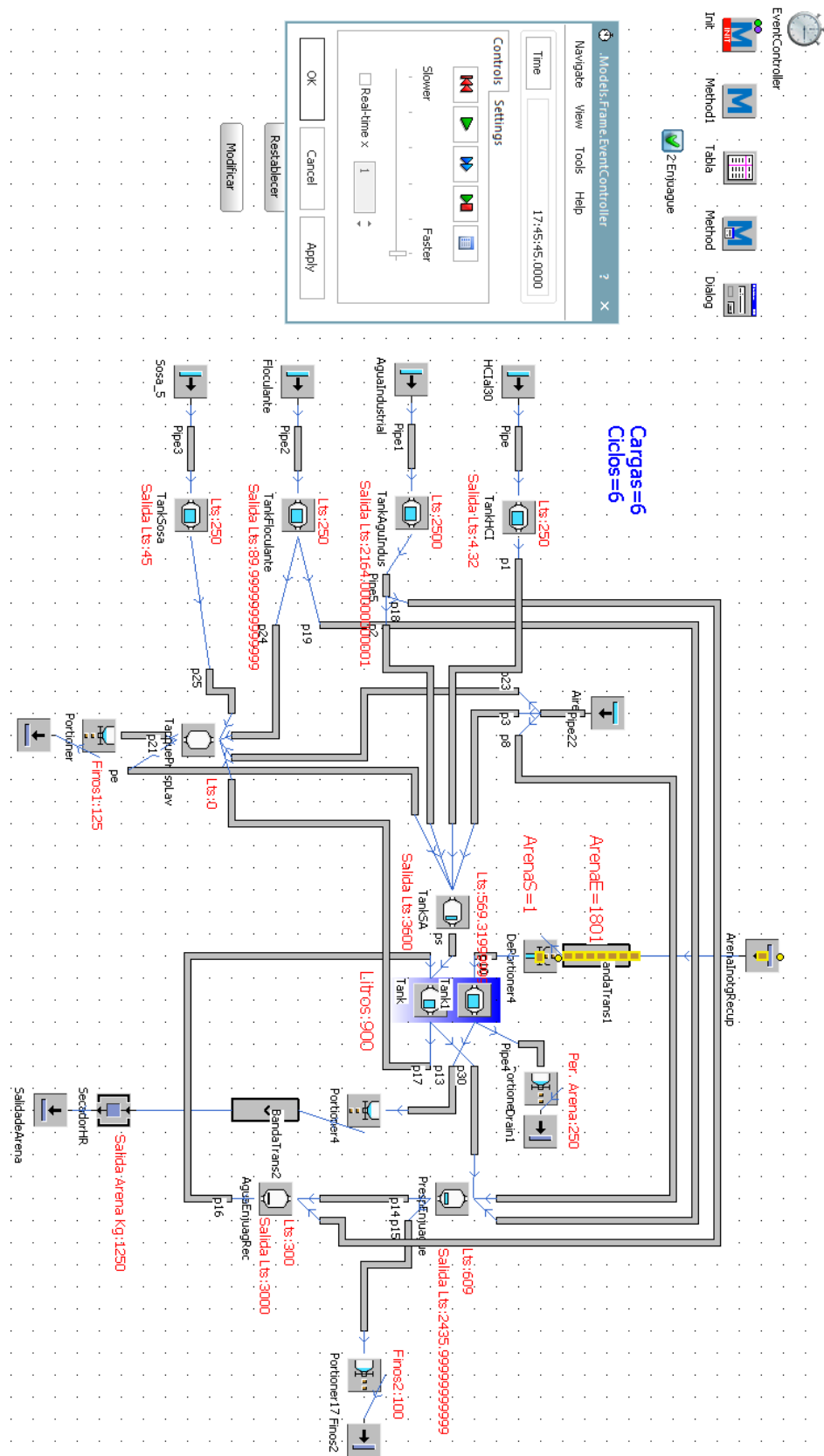


Anexo 2.- Simbología en Plant Simulation® de diagrama de flujo del proceso de recuperación de arena para fundición

Símbolo	Significado
	Entrada de material (liquido).
	Entrada de material (solido).
	Salida de material (solido).
	Tubería.
	Tanque de almacenamiento.
	Proceso.
	Intercambiador de material (solido-liquido).
	Intercambiador de material (liquido-solido).
	Banda Transportadora.
	Escritura de método de programación.
	Tabla de datos .
	Tabla de adquisición de datos.
	Selector.
	Tiempo.
	Conector.
	Contador de cargas de material nuevo.
	Contador de Ciclos.
	Medidor de nivel en tanques .
	Botón.



Anexo 5.- Modelo de simulación final.



Anexo 6.- Programación de parámetros de operación del ciclo de recuperación de arena.

```

var i : integer;
var L : integer;
Ciclos:=1;
L:= tabla[2,8]*2
i:=1
Cargas:=1
if Enj.value = true then
while Cargas<=20 loop
    if TankSA.currentamount<=600 then
        p19.pipeOpened:= false;
        p20.pipeOpened:= false;
        p25.pipeOpened:= false;
        p24.pipeOpened:= false;
        p19.pipeOpened:= false;
        p20.pipeOpened:= false;
        p14.pipeOpened:= false;
        p15.pipeOpened:= false;
        p21.pipeOpened:= false;
        pe.pipeOpened:= false;
        ps.pipeOpened:= false;
        p30.pipeOpened:= false;
        p13.pipeOpened:= false;
        p17.pipeOpened:= false;
        p16.pipeOpened:= false;
        p10.pipeOpened:= false;
        p18.pipeOpened:= True;
        p2.pipeOpened:= True;
        p1.pipeOpened:= False;
        Pipe4.pipeOpened:=False;
        TankAguIndus.outflowRate:= L/450;
        AguaIndustrial.outflowRate:=L/450;
wait (450);
        p2.pipeOpened:= false;
        p18.pipeOpened:= false;
        p1.outflowRate:= ((TankSA.currentamount/100)*tabla[2,11])/150-AH
        Pipe.outflowRate:=p1.outflowRate
        p1.pipeOpened:= True;
        Pipe.pipeOpened:= True;
wait (150);
        p1.pipeOpened:= False;
        Pipe.pipeOpened:= False;

i:=1
end;
-----
while i<=1000 loop
    p13.pipeOpened:= false;
    Pipe4.pipeOpened:= false;
    ps.outflowRate:= (tabla[2,5]/900);

```

```

        p10.outflowRate:= (tabla[2,15]/900);
        ps.pipeOpened:= true;
        p10.pipeOpened:= true;
    wait (900);
        ps.pipeOpened:= false;
        p10.pipeOpened:= false;
    wait ((tabla[2,1]+3)*60)-600;-----
    p14.outflowRate:=(PrespEnjuague.currentamount-tabla[2,13])/300;
        p14.pipeOpened:= true;
        p15.outflowRate:=(tabla[2,13]/300);
        p15.pipeOpened:= true;----Finos Presp Enjuag
    wait (300);
        p15.pipeOpened:= False;
    wait (300);
        p14.pipeOpened:= false;
        p17.pipeOpened:= true;
        ---Tiempo de Llenado----
    wait (150);
        p17.pipeOpened:= false;-----reposo y agregado de sosa
        p24.outflowRate:=
        ((TanquePrespLav.currentamount/100)*tabla[2,10])/150----Floculante
        p25.outflowRate:=
        ((TanquePrespLav.currentamount/100)*tabla[2,9])/150-----Sosa
        Pipe2.outflowRate:=p24.outflowRate
        Pipe3.outflowRate:=p25.outflowRate
        p25.pipeOpened:= true;
        p24.pipeOpened:= true;
    wait (150);
        ---Primer Enjuague-----
        p16.outflowRate:= (tabla[2,6]/720);
        p16.pipeOpened:= true;
        p25.pipeOpened:= false;
        p24.pipeOpened:= false;
    wait (720);
        p16.pipeOpened:= false;
    wait (tabla[2,2]+3)*60;
        p30.pipeOpened:= true;
    wait (300);
        ---Segundo Enjuague-----
        p30.pipeOpened:= False;
        p16.outflowRate:= (tabla[2,7]/720);
        p16.pipeOpened:= true;
        p21.outflowRate:= (tabla[2,12]/720);
        p21.pipeOpened:=true; -----finos Pre lav.
    wait (720);
        p21.pipeOpened:=false;
        pe.pipeOpened:= true;
        p16.pipeOpened:= false;
        ps.pipeOpened:= false;
    wait (tabla[2,3]+3)*60;
        pe.pipeOpened:= false;

```

```

        p30.pipeOpened:= true;
        -----Tiempo de Llenado-----
    wait (150);
        p30.pipeOpened:= false;
        p19.outflowRate:=
((PrespEnjuague.currentamount/100)*tabla[2,10])/150-----Floculante
        p20.outflowRate:=
((PrespEnjuague.currentamount/100)*tabla[2,9])/150-----Sosa
        Pipe2.outflowRate:=p19.outflowRate
        Pipe3.outflowRate:=p20.outflowRate
        p19.pipeOpened:= true;
        p20.pipeOpened:= true;
    wait (150);
        p13.outflowRate:=(Tank1.currentamount-
tabla[2,14])/(tabla[2,4]*60);
        p13.pipeOpened:= true;
        Pipe4.outflowRate:= tabla[2,14]/(tabla[2,4]*60);
        Pipe4.pipeOpened:= True;
        p19.pipeOpened:= false;
        p20.pipeOpened:= false;
    wait tabla[2,4]*60;
    if TankSA.currentamount<=600 then
        i:=1010;
    else
        i:=1;
    end;
        i:=i+1;
        Ciclos:=Ciclos+1;
end;
        Cargas:=Cargas+1;
end;
-----cambio de rutina-----
else
    while Cargas<=20 loop
    if TankSA.currentamount<=600 then;
        p19.pipeOpened:= false;
        p20.pipeOpened:= false;
        p25.pipeOpened:= false;
        p24.pipeOpened:= false;
        p19.pipeOpened:= false;
        p20.pipeOpened:= false;
        p14.pipeOpened:= false;
        p15.pipeOpened:= false;
        p21.pipeOpened:= false;
        pe.pipeOpened:= false;
        ps.pipeOpened:= false;
        p30.pipeOpened:= false;
        p13.pipeOpened:= false;
        p17.pipeOpened:= false;
        p16.pipeOpened:= false;
        p10.pipeOpened:= false;

```

```

    p18.pipeOpened:= True;
    p2.pipeOpened:= True;
    p1.pipeOpened:= False;
    Pipe4.pipeOpened:=False;
    TankAguIndus.outflowRate:= L/450;
    AguaIndustrial.outflowRate:=L/450;
wait (450);
    p2.pipeOpened:= false;
    p18.pipeOpened:= false;
    p1.outflowRate:= ((TankSA.currentamount/100)*tabla[2,11])/150-----
---AH
    Pipe.outflowRate:=p1.outflowRate
    p1.pipeOpened:= True;
    Pipe.pipeOpened:= True;
wait (150);
    p1.pipeOpened:= False;
    Pipe.pipeOpened:= False;
i:=1
end;
-----
    while i<=1000 loop

        p13.pipeOpened:= false;
        Pipe4.pipeOpened:= false;
        ps.outflowRate:= (tabla[2,5]/900);
        p10.outflowRate:= (tabla[2,15]/900);
        ps.pipeOpened:= true;
        p10.pipeOpened:= true;
wait (900);
        ps.pipeOpened:= false;
        p10.pipeOpened:= false;
wait ((tabla[2,1]+3)*60)-600
        p14.outflowRate:=(PrespEnjuague.currentamount-tabla[2,13])/300;
        p14.pipeOpened:= true;
        p15.outflowRate:=(tabla[2,13]/300);
        p15.pipeOpened:= true;----Finos Presp Enjuag
wait (300);
        p15.pipeOpened:= False;
wait (300);
        p14.pipeOpened:= false;
        p17.pipeOpened:= true;
        ---Tiempo de Llenado----
wait (150);
        p17.pipeOpened:= false;-----reposo y agregado de sosa
        p24.outflowRate:=
((TanquePrespLav.currentamount/100)*tabla[2,10])/150-----Floculante
        p25.outflowRate:=
((TanquePrespLav.currentamount/100)*tabla[2,9])/150-----Sosa
        Pipe2.outflowRate:=p24.outflowRate
        Pipe3.outflowRate:=p25.outflowRate
        p25.pipeOpened:= true;

```



```

        p24.pipeOpened:= true;
wait (150);
    --- Sin Primer Enjuague-----
    p25.pipeOpened:= false;
    p24.pipeOpened:= false;
    ---Segundo Enjuague-----
    p16.outflowRate:= (tabla[2,7]/720);
    p16.pipeOpened:= true;
    p21.outflowRate:= (tabla[2,12]/720);
    p21.pipeOpened:=true; -----finos Pre lav
wait (720);
    p21.pipeOpened:=false;
    pe.pipeOpened:= true;
    p16.pipeOpened:= false;
    ps.pipeOpened:= false;
wait (tabla[2,3]+3)*60;
    pe.pipeOpened:= false;
    p30.pipeOpened:= true;
    -----Tiempo de Llenado-----
wait (150);
    p30.pipeOpened:= false;
    p19.outflowRate:=
((PrespEnjuague.currentamount/100)*tabla[2,10])/150-----Floculante
    p20.outflowRate:=
((PrespEnjuague.currentamount/100)*tabla[2,9])/150-----Sosa
    Pipe2.outflowRate:=p19.outflowRate
    Pipe3.outflowRate:=p20.outflowRate
    p19.pipeOpened:= true;
    p20.pipeOpened:= true;
wait (150);
    p13.outflowRate:=(Tank1.currentamount-tabla[2,14])/(tabla[2,4]*60);
    p13.pipeOpened:= true;
    Pipe4.outflowRate:= tabla[2,14]/(tabla[2,4]*60);
    Pipe4.pipeOpened:= True;
    p19.pipeOpened:= false;
    p20.pipeOpened:= false;
wait tabla[2,4]*60;
if TankSA.currentamount<=600 then
    i:=1010;
else
    i:=1;
end;
        i:=i+1;
        Ciclos:=Ciclos+1;
end;
        Cargas:=Cargas+1;

end;
end;

```